

Переключение длины волны стимулированного излучения в лазерных гетероструктурах InGaAs/AlGaInAs при оптической накачке

А.А.Андронов, Ю.Н.Ноздрин, А.В.Окомельков, А.Н.Яблонский,
А.А.Мармалюк, Ю.Л.Рябоштан

В ближнем ИК диапазоне получено стимулированное излучение гетероструктур InGaAs/AlGaInAs при оптической накачке. Обнаружено переключение длины волны стимулированного излучения от 1.9 мкм до 1.55 мкм и затем до 1.2 мкм при увеличении интенсивности оптической накачки. Возникновение переключения связано с конкретной геометрией структуры (профилем ширины запрещенной зоны по толщине) и конкуренцией стимулированных излучений на разных частотах в разных пространственных областях структуры.

Ключевые слова: стимулированное излучение, полупроводниковые гетероструктуры, оптическая накачка, переключение частоты генерации.

1. Введение

В настоящей работе сообщается о наблюдении стимулированного излучения гетероструктур на основе соединений InGaAs/AlGaInAs при оптической накачке. Нами обнаружено переключение частоты стимулированного излучения в ИК диапазоне при изменении интенсивности оптической накачки. Мы интерпретируем этот эффект следующим образом: при изменении концентрации фотовозбужденных носителей стимулированное излучение возникает в различных областях гетероструктуры с существенно различающимися (вследствие подбора состава) энергиями запрещенной зоны.

Перестройка длины волны стимулированного излучения гетеролазеров в коротковолновую сторону с увеличением интенсивности накачки, вызванная расширением полосы усиления и возникновением стимулированного излучения на переходах с высших уровней квантовой ямы, хорошо известна в физике гетеролазеров (см., напр., [1, 2]). В настоящей работе мы наблюдали переключение длины волны стимулированного излучения, изменяющейся почти на 50%. Причем такое переключение наблюдалось только в структурах со специфической конструкцией гетероструктуры. Основанные на подобных эффектах переключения «многоцветные» гетеролазеры возможно могли бы найти определенные применения.

2. Экспериментальные результаты

В экспериментах использовалось фотовозбуждение носителей излучением импульсного (длительность им-

пульсов около 80 нс) Nd:YAG-лазера (с длиной волны $\lambda = 1.064$ мкм) и излучением параметрического генератора света (ПГС) на $\lambda = 0.75$ и 1.65 мкм при комнатной температуре. При этом длительность импульсов излучения ПГС составляла ~ 5 нс, а частота повторения – 10 Гц. Из выращенных квантовых структур выкалывались образцы прямоугольной формы с линейными размерами от одного до нескольких миллиметров. Оптическая накачка осуществлялась по нормали к плоскости образца, при этом диаметр пятна засветки был больше образца. Возникающее в структурах излучение из торца образца (распространяющееся в плоскости квантовых ям) фокусировалось на входную щель монохроматора. После монохроматора устанавливались приемники излучения для регистрации изменения его интенсивности на разных длинах волн. При необходимости перед приемниками помещались соответствующие фильтры, позволяющие убедиться в правильности определения длины волны регистрируемого излучения. Подробное описание экспериментальной установки дано в [3].

Все наблюдаемые нами эффекты получены на квантоворазмерных гетероструктурах, выращенных на подложках InP толщиной $h = 350$ мкм и имеющих концентрацию носителей $n = (2 - 3) \times 10^{18}$ см $^{-3}$. Толщина верхнего, закрывающего структуру слоя Al $_{0.48}$ In $_{0.52}$ As для использованных структур составляла приблизительно 500 Å. Следует отметить, что химический состав этих слоев не слишком важен для обсуждаемых эффектов, т.к. ширина запрещенной зоны для них относительно велика по сравнению с энергией кванта оптической накачки, поэтому излучение накачки в них практически не поглощается. Наличие поверхностных слоев существенно только для формирования оптического волновода, а также для уменьшения поверхностной рекомбинации и внешней защиты слоев гетероструктуры. Толщина переходных слоев между подложкой и волноводной структурой и между структурой и закрывающим ее поверхностным слоем составляет для использованных образцов приблизительно 500 Å. Исследования проводились на трех гетероструктурах (№ 1, 2 и 3), зависимости ширины

А.А.Андронов, Ю.Н.Ноздрин, А.В.Окомельков, А.Н.Яблонский. Институт физики микроструктур РАН, Россия, 603950 Нижний Новгород, ГСП-105; e-mail: okom@ipm.sci-ppov.ru
А.А.Мармалюк, Ю.Л.Рябоштан. ООО «Сигм Плюс», Россия, 117342 Москва, ул. Введенского, 3

Поступила в редакцию 29 апреля 2008 г., после доработки – 10 ноября 2008 г.

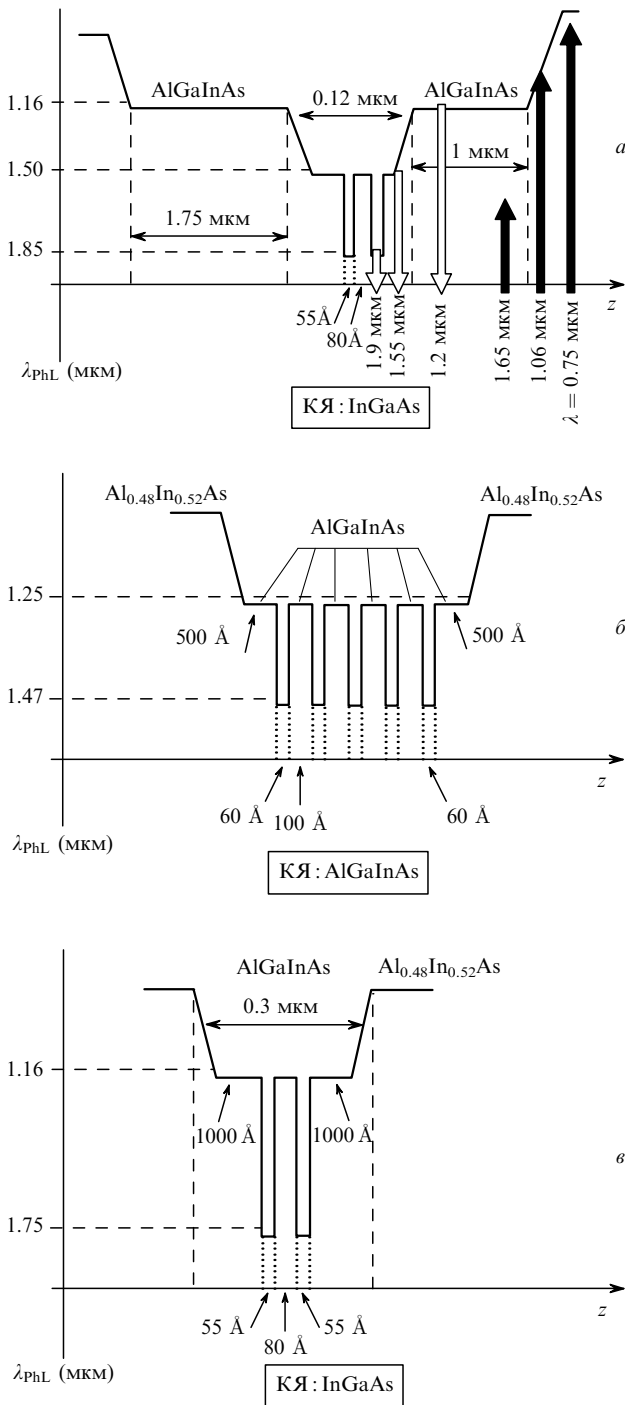


Рис.1. Пространственное изменение ширины запрещенной зоны по толщине лазерной гетероструктуры № 1 (а) (черными стрелками показаны кванты накачки, белыми стрелками – кванты стимулированного излучения), № 2 (б) и № 3 (в). По оси ординат отложена длина волны, соответствующая максимальному значению фотолуминесценции (при малой интенсивности накачки) структуры.

запрещенной зоны которых от координаты в направлении, перпендикулярном плоскости структуры, схематично изображены на рис.1.

Спектры излучения образца, полученного из структуры № 1, при накачке на $\lambda = 0.75$ мкм показаны на рис.2. Образец представлял собой прямоугольник размером 3×4 мм со сколотыми краями. При очень малой мощности накачки наблюдалось спонтанное излучение в спектральной области длин волн около 1.9 мкм, что соответствует излучательным межзонным переходам из кванто-

вых ям. При достижении оптической накачкой порога возникало стимулированное излучение на $\lambda = 1.9$ мкм. С ростом интенсивности накачки от 1.6 до 10 кВт/см² (спектры 1–4) интенсивность линии стимулированного излучения на длине волны около 1.9 мкм увеличивалась (рис.2,а). Дальнейшее увеличение мощности накачки (спектры 4–7) ведет к уменьшению интенсивности этой спектральной линии (рис.2,б). При интенсивности накачки, превышающей ~ 22 кВт/см², в спектре излучения возникает и начинает усиливаться линия излучения около 1.54–1.55 мкм. И при мощности накачки 86 кВт/см² (спектр 7 на рис.2,б) происходит полное переключение линий – наблюдается линия стимулированного излучения на длине волны около 1.54 мкм, тогда как в области около 1.9 мкм сигнал практически отсутствует, там остается только слабый сигнал спонтанного излучения. При дальнейшем росте интенсивности накачки линия стимулированного излучения на длине волны около 1.5 мкм постепенно гаснет, и загорается линия на $\lambda = 1.2$ мкм (рис.2,в).

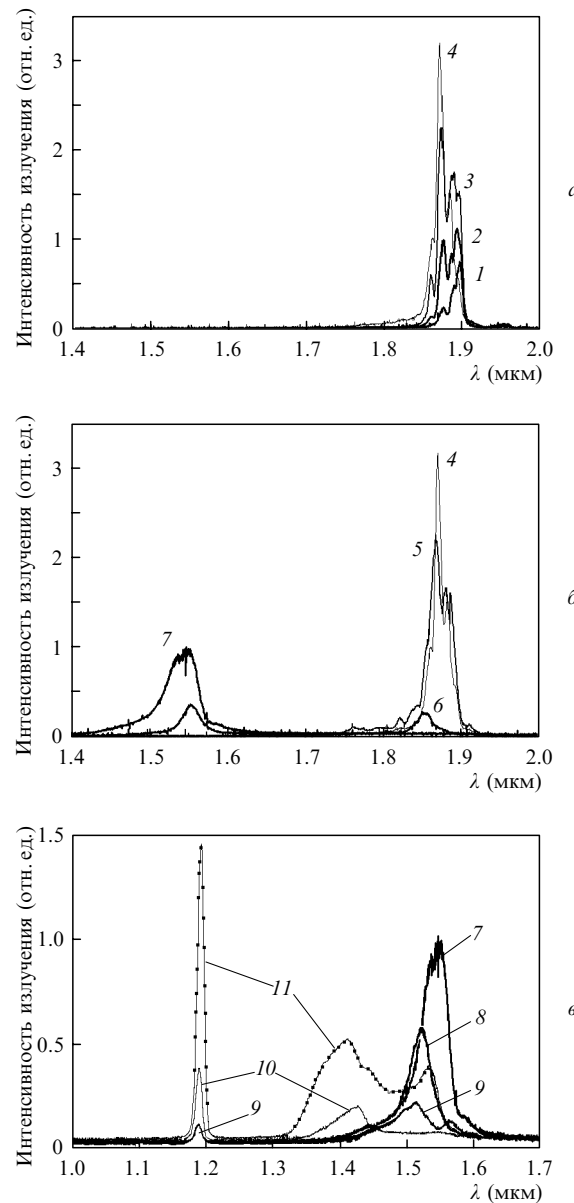


Рис.2. Спектры излучения лазерной гетероструктуры № 1 при плотности оптической накачки 1.6 (1), 3.0 (2), 5.4 (3), 10 (4), 21 (5), 24 (6), 86 (7), 112 (8), 152 (9), 250 (10) и 380 кВт/см² (11) на $\lambda = 0.75$ мкм.

Таким образом, показано, что с ростом интенсивности накачки на $\lambda = 0.75$ мкм дважды имеет место перестройка длины волны стимулированного излучения гетероструктуры – от 1.9 мкм к 1.5 мкм и от 1.5 мкм к 1.2 мкм. Этот же эффект наблюдался нами и при накачке импульсным излучением Nd:YAG-лазера с $\lambda = 1.06$ мкм. Таким образом, эффект переключения может возникать при оптической накачке с различной длиной волны, необходимо лишь, чтобы квант энергии накачки был больше соответствующей ширины запрещенной зоны в гетероструктуре.

В обоих указанных случаях заброс носителей в результате поглощения оптической накачки происходит на энергетические уровни, которые лежат в зоне проводимости выше уровня, соответствующего прямому оптическому переходу на 1.2 мкм. С этих «начальных» уровней носители релаксируют на более низкие уровни с испусканием оптических фононов. При достаточной интенсивности накачки для самого нижнего уровня начинает выполняться условие инверсной населенности и возникает стимулированное излучение. С увеличением накачки концентрация носителей на всех уровнях возрастает, и может возникнуть такая ситуация, когда условие инверсии населенностей начинает выполняться для некоторых верхних уровней, что приводит к появлению стимулированного излучения с них, сопровождающегося увеличением числа фотонов в активном слое и соответствующим ростом вероятности излучательных переходов. И если вероятность вынужденного излучения становится сравнима с вероятностью излучения оптического фонона, то большая часть фотовозбужденных носителей релаксирует в валентную зону с излучением фотона (а не фонона), минуя нижележащие уровни. Вследствие этого населенность нижележащих уровней падает, и стимулированное излучение с них гаснет.

С целью проверки этого механизма переключения длин волн стимулированного излучения был осуществлен эксперимент, в котором оптическая накачка проводилась светом с $\lambda = 1.65$ мкм. В этом случае, как и следовало ожидать, при больших мощностях накачки никакого переключения не возникало, а стимулированное излучение наблюдалось лишь на длине волны 1.9 мкм.

Теоретически возможно и другое объяснение наблюдаемого нами эффекта, связанное с увеличением поглощения на свободных носителях, которое, как известно, достигает наибольшей величины на меньших частотах. То есть возможна, в принципе, ситуация, когда на низколежащих энергетических уровнях инверсия населенностей сохраняется, но с увеличением интенсивности накачки «включается» сильное поглощение на свободных носителях (на такую возможность обратил наше внимание Р.А.Сурис). Для выяснения этого нами были проведены дополнительные исследования, заключающиеся в следующем. При возникновении стимулированного излучения спектр выглядит таким образом: по краям линии стимулированного излучения всегда наблюдаются пологие «хвосты» широкополосного спонтанного излучения малой интенсивности. И по изменению величины этого спонтанного излучения можно судить о том, уменьшается или увеличивается населенность переходов в данной спектральной области. Эксперименты показали, что при «гашении» спектральной линии стимулированного излучения (например, на 1.9 мкм), возникающем при росте интенсивности накачки, интенсивность сопутствующего

спонтанного излучения (по краям линии стимулированного излучения) также уменьшается. Это означает, что в данном случае имеет место уменьшение числа частиц на длинноволновых переходах. Если бы наблюдаемый эффект «гашения» стимулированного излучения был вызван ростом поглощения на свободных носителях (приводящим к уменьшению и занулению коэффициента усиления), то концентрация частиц, а следовательно, и интенсивность спонтанного излучения должны были бы увеличиваться с ростом интенсивности накачки. Поэтому наблюдаемый нами эффект переключения длины волны стимулированного излучения не связан в данном случае с увеличением в системе поглощения на свободных носителях, а вызван конкуренцией различных стимулированных излучений, как это описано выше.

Пространственное изменение ширины запрещенной зоны по толщине в гетероструктуре №2 схематично изображено на рис.1,б. Основное ее отличие от гетероструктуры №1 заключается в существенно меньшей (около 500 Å) ширине «полок» над ямами. Спектр излучения гетероструктуры №2 при оптической накачке Nd:YAG-лазером на $\lambda = 1.06$ мкм изображен на рис.3. При этом линия стимулированного излучения (существует пороговая интенсивность накачки, выше которой наблюдается резкий рост мощности излучения гетероструктуры) при различных интенсивностях накачки наблюдается только в области длин волн около 1.53 мкм, что соответствует (см. рис.1,б) переходам из квантовых ям в валентную зону. На длине волны около 1.28 мкм наблюдается слабое спонтанное излучение, причем стимулированное излучение в этой спектральной области не возникает даже при большой интенсивности накачки, тогда как интенсивность спектральной линии на 1.53 мкм увеличивается с ростом накачки вплоть до момента разрушения образца. Таким образом никакого переключения длины волны стимулированного излучения в структуре №2 не наблюдается.

Аналогичная ситуация имеет место и в лазерной гетероструктуре №3, схема изменения ширины запрещенной зоны по толщине для которой представлена на рис.1,в. В спектрах спонтанного излучения этой структуры при накачке Nd:YAG-лазером на 1.06 мкм, интенсивность накачки 67 кВт/см², наблюдались три локальных максимума, показанные на рис.4 (кривые 1). При интенсивности накачки 100 кВт/см² (кривые 2) в спектральных областях, изображенных на рис.4,а и б, появляются узкие линии стимулированного излучения. При этом на пороге их возникновения наблюдались большие

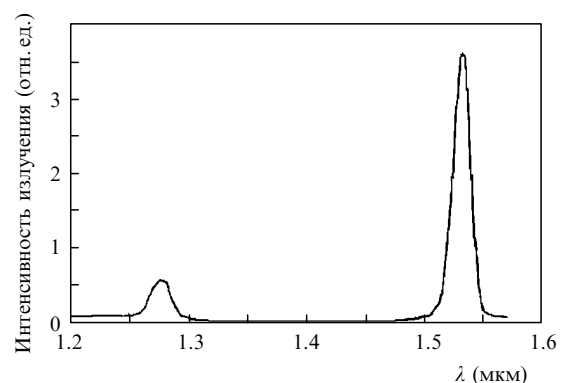


Рис.3. Спектр излучения лазерной гетероструктуры №2 при оптической накачке Nd:YAG-лазером на $\lambda = 1.06$ мкм.

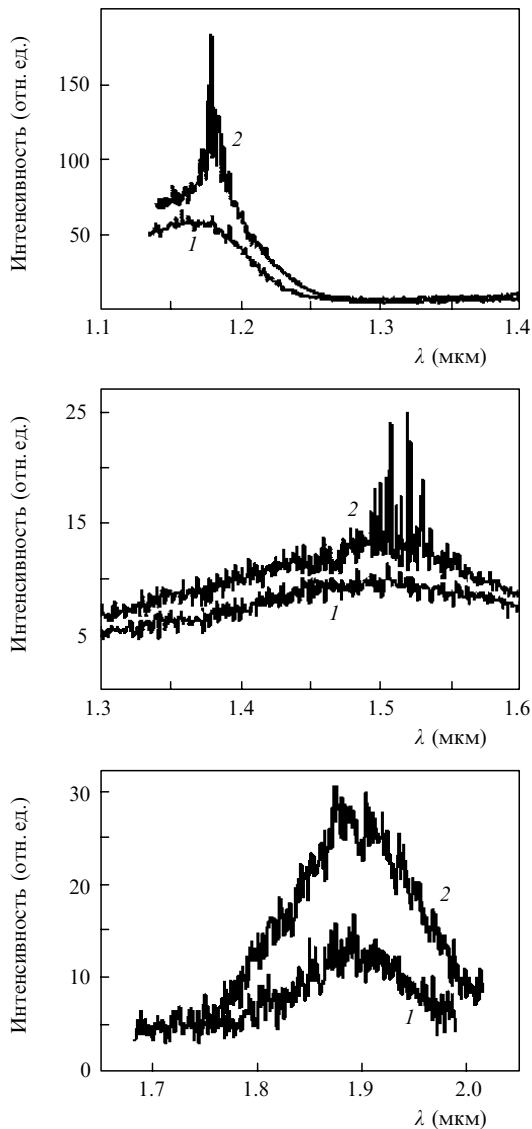


Рис.4. Спектры излучения лазерной гетероструктуры № 3 при оптической накачке Nd:YAG-лазером на $\lambda = 1.06$ мкм при интенсивности лазерной накачки 67 (1) и 100 кВт/см² (2), полученные с помощью разных фотоприемников.

флуктуации мощности излучения, в несколько раз превышающие флуктуации сигнала лазера накачки. Наибольшая интенсивность стимулированного излучения имеет место для излучения с верхнего энергетического уровня. Однако в спектральном диапазоне, соответствующем рис.4,в, стимулированное излучение не возникает (нет сужения спектра), и наблюдается только спонтанное излучение. Таким образом, поведение спектров излучения в данном случае качественно отличается от поведения спектров для гетероструктуры № 1.

3. Заключение

Наблюдавшееся нами в гетероструктуре № 1 подавление линий стимулированного излучения и связанное с этим переключение длины волны излучения при увеличе-

нии интенсивности оптической накачки проявляется лишь при высоком уровне фотовозбуждения носителей, когда при разных уровнях накачки возникает конкуренция для возникновения стимулированного излучения на разных длинах волн, определяемых пространственным профилем ширины запрещенной зоны. Можно предположить, что данный эффект может наблюдаться в структурах, в которых создан целый набор ширины запрещенной зоны. Соответствующие частоты переходов в структуре могут быть подобраны так, что они будут совпадать с каким-нибудь изучаемым спектром (например, с двумя или тремя частотами в спектре молекул какого-нибудь газа).

В гетероструктурах № 2 и № 3 аналогичного эффекта переключения длины волны стимулированного излучения не наблюдалось, а имела место двухчастотная генерация, соответствующая разным пространственным областям гетероструктуры.

Инжекционные лазеры на структурах с параметрами, близкими к исследованным в настоящей работе, изучались в [4], но ни переключения длин волн, ни двухчастотной генерации в них не наблюдалось. Нам представляется, что наилучшие условия для описанного нами эффекта переключения длин волн генерации могут быть реализованы в лазерах с оптической накачкой, когда и электроны и дырки появляются в активной области с одной стороны гетероструктуры. В инжекционных лазерах дырки и электроны появляются с разных сторон, и поэтому эффекты переключения длины волны стимулированного излучения обсуждаемого типа могут быть подавлены.

Следует отметить, что в экспериментах мы использовали квантоворазмерные гетероструктуры, разработанные для изготовления инжекционных лазеров и специально не оптимизированные для условий наших экспериментов. С этой точки зрения переключение длины волны стимулированного излучения получено нами не в каких-то особых условиях и является поэтому довольно общим результатом. Оптимизация квантовых структур по составу и профилю изменения ширины запрещенной зоны может привести, как мы полагаем, к получению еще более впечатляющих результатов. Создание многоступенчатого профиля ширины запрещенной зоны может обеспечить переключение частоты стимулированного излучения в соответствии с заранее предусмотренным сценарием.

Авторы благодарны Р.А.Сурису за интерес к работе и обсуждения.

Настоящая работа поддержана РФФИ (гранты № 06-02-16685-а, 07-02-00935-а, 07-02-13616-офи_ц), программой РАН «Проблемы радиофизики», Федеральным агентством по науке и инновациям (Государственный контракт № 02.515.11.508).

1. Жуков А.Е., Ковш А.Р., Устинов В.М., Егоров А.Ю. и др. *ФТП*, **33** (9), 1111 (1999).
2. Андронов А.А., Ноздрин Ю.Н., Окомельков А.В., et al. *Proc. SPIE Int. Soc. Opt. Eng.*, **6636**, 66360U (2007).
3. Андронов А.А., Ноздрин Ю.Н., Окомельков А.В. и др. *ФТП*, **42** (2), 177 (2008).
4. Лютецкий А.В., Боршев К.С., Бондарев А.Д. и др. *ФТП*, **41** (7), 883 (2007).