

Стимулированное излучение на длине волны 2.5 мкм, при комнатной температуре, из оптически возбужденных структур на основе $\text{Cd}_x\text{Hg}_{1-x}\text{Te}$

© А.А. Андронов, Ю.Н. Ноздрин, А.В. Окомельков[¶], В.С. Варавин^{¶¶*}, Н.Н. Михайлов*, Г.Ю. Сидоров*

Институт физики микроструктур Российской академии наук,
603950 Нижний Новгород, Россия

* Институт физики полупроводников Сибирского отделения Российской академии наук,
630090 Новосибирск, Россия

(Получена 4 августа 2009 г. Принята к печати 4 сентября 2009 г.)

Обсуждаются основные требования к оптимизации структур на основе КРТ ($\text{Cd}_x\text{Hg}_{1-x}\text{Te}$) для увеличения длины волны стимулированного излучения из них при оптической накачке. Экспериментально продемонстрировано возникновение стимулированного излучения в диапазоне 2–2.5 мкм при комнатной температуре на оптимизированных КРТ-структурах, выращенных на GaAs-подложках с помощью метода молекулярно-пучковой эпитаксии. Полученные экспериментальные данные являются первыми результатами по наблюдению стимулированного излучения на этих длинах волн при комнатной температуре из КРТ-структур. Измеренные при этом значения коэффициента усиления в активной среде являются весьма большими и доходят до значений 50 см^{-1} , что позволяет надеяться на возможность дальнейшего продвижения в длинноволновую область.

1. Введение

Изучение материала кадмий–ртуть–теллур (КРТ) $\text{Cd}_x\text{Hg}_{1-x}\text{Te}$, а также твердотельных пленок и структур на его основе исторически было связано прежде всего с созданием фотоприемников инфракрасного (ИК) диапазона (см., например, [1,2]). Существовали лишь немногочисленные попытки использовать этот материал для создания лазеров ИК диапазона. Но существенно продвижения в длинноволновую область достигнуто не было, что объясняется, по-видимому, недостаточно высоким качеством образцов, а также использованием образцов, не являющихся оптимальными с точки зрения получения лазерной генерации. В литературе сообщалось в основном о проведении низкотемпературных экспериментов (при температуре не выше температуры жидкого азота). Так, в работе [3] сообщалось о создании лазеров с оптической накачкой, которые излучали в области длин волн от 1.25 до 2.97 мкм при температуре жидкого азота. Непрерывная генерация на длине волны 2.79 мкм была получена при температуре 12 К. Стимулированное излучение пленок КРТ для $x = 0.5$ на длине волны 2.13 мкм наблюдалось в работе [4]. Стимулированное излучение из пленок КРТ с $x = 0.46$ (при $T = 12\text{ К}$, на длине волны $\lambda \approx 2.42\text{ мкм}$), выращенных на подложке CdTe, наблюдалось в работе [5]. При температуре жидкого азота максимальная длина волны наблюдаемого стимулированного излучения в ранних работах составляла 2.97 мкм [3]. Ограничение длины волны сверху часто связывали при этом с проявлением оже-рекомбинации для узкощелевых полупроводников (см., например, [1]).

Наши последние работы (см. [6–12]) и данная работа показывают, что ограничения, связанные с оже-рекомбинацией, являются в данном случае еще не слишком жесткими, и существует реальная возможность экспериментально продвинуться по частоте стимулированного излучения в длинноволновую область. В наших работах сообщалось (см., например, [10]), что при $T = 77\text{ К}$ стимулированное излучение наблюдалось на длинах волн до 4.5 мкм (еще в неоптимизированных по параметрам образцах). В данной работе показано, что оптимизация параметров образцов КРТ позволяет увеличить частоту лазерной генерации до 2–2.5 мкм при комнатной температуре.

К настоящему времени нами уже довольно хорошо исследована возможность получения стимулированного излучения из структур на основе КРТ (см., например, [6–12]). В этих работах были проведены исследования стимулированного излучения из гетероструктур на основе $\text{Cd}_x\text{Hg}_{1-x}\text{Te}$ при оптической накачке на длине волны 1.06 мкм при температурах от азотной до комнатной на длинах волн 1.4–4.5 мкм. В этом диапазоне длин волн стимулированное излучение наблюдалось для образцов разной толщины, выращенных как на GaAs, так и на Si-подложках при температуре $T = 77\text{ К}$. При комнатной температуре стимулированное излучение наблюдалось в диапазоне длин волн $\lambda < 1.7\text{ мкм}$ [10,11]. Однако все эти результаты были получены на образцах, неоптимизированных для целей получения стимулированного излучения (толщина многих образцов была слишком большой для того, чтобы их можно было бы эффективно „прокачать“ с помощью оптической накачки, а непрокаченная лазерным излучением накачки часть слоя обладает сильным поглощением). Существенная часть данной работы была посвящена оптимизации образцов КРТ для эффективного получения стимулированного излучения. Для оптимизации образцов нами были

[¶] E-mail: okom@ipm.sci-nnov.ru

^{¶¶} E-mail: varavin@isp.nsc.ru

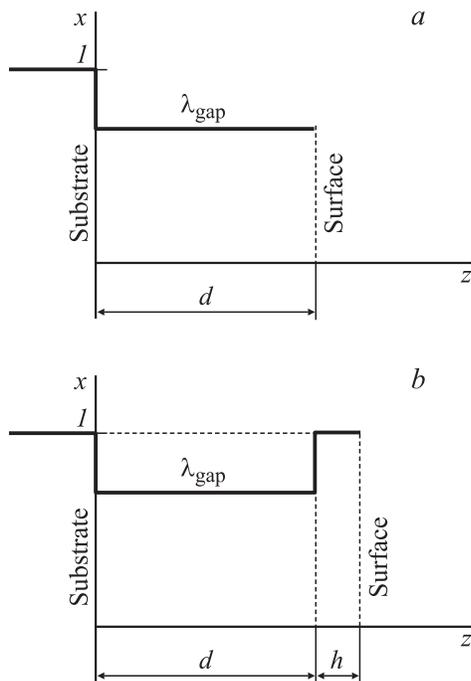


Рис. 1. Схема поперечного состава образцов КРТ для оптимизации: *a* — случай без внешнего покрывающего слоя, *b* — случай с покрывающим внешним слоем со стороны свободной поверхности; d — толщина однородного тонкого слоя КРТ с длиной волны на межзонном переходе λ_{gap} , z — координата в направлении поперек пленки (отсчитывается от буферного слоя на поверхности подложки).

предложены две следующие схемы пространственного распределения состава (а потому и зонной структуры).

1) Одна из структур изображена на рис. 1, *a* — структура с тонким однородным по толщине слоем КРТ. Толщина d у структур должна быть небольшой, 0.6–1 мкм, т.е. порядка глубины проникновения поля оптической накачки в образец. Такая толщина дает возможность хорошо „прокачать“ с помощью оптической накачки весь слой КРТ (в толстых образцах создание активной среды происходит, по-видимому, благодаря диффузии носителей). Это должно привести к тому, что пороговое значение интенсивности накачки для возникновения стимулированного излучения должно существенно уменьшиться. Наличие поверхностного слоя широкозонного материала увеличивает время жизни неравновесных носителей, но оно может отрицательно сказаться по двум причинам. Если этот слой окажется поглощающим для накачки, то в активный слой КРТ попадет меньше излучения накачки. И кроме того, при росте структуры между объемным и поверхностным слоем возникнет, очевидно, некоторый переходной слой, толщина которого может быть не слишком маленькой (в ранее исследованных образцах толщина этого переходного слоя была около 0.5 мкм). Наличие такого переходного слоя также приведет к поглощению в нем. Однако слой КРТ не должен быть слишком тонким, для того чтобы в образовавшемся оптическом волноводе (внутри слоя

КРТ) хорошо могли распространяться незатухающие волны. При изготовлении таких структур профиль перехода от подложки к рабочему слою КРТ должен быть резким, насколько это возможно (наличие переходных областей приведет к размытию спектральных линий). Необходимо проведение также оптимизации образцов в смысле режима их отжига. Очевидно, что при различных режимах отжига возможно получение различной степени однородности, а потому — времени жизни неравновесных носителей.

2) Поскольку наличие поверхностного слоя все-таки должно увеличить время жизни, интересно было бы исследовать образцы и с достаточно тонким поверхностным „закрывающим“ слоем, прозрачным для длины волны лазера накачки (в наших ранних работах это была длина волны 1.06 мкм) (это может быть слой CdTe или слой КРТ с составом $x = 0.85-1$). Структура такого типа изображена на рис. 1, *b*. Значение толщины поверхностного слоя h , по-видимому, не существенно в том случае, если он будет прозрачен для волны накачки. Здесь важно только, чтобы переход между поверхностным слоем (толщиной h) и рабочим слоем КРТ (толщиной d) был как можно более узким (или резким).

Проведение экспериментов на структурах этих двух типов может быть также интересно и для понимания того, насколько „закрывающий слой“ может улучшить ситуацию — увеличить время жизни неравновесных носителей.

2. Оптимизированные образцы и экспериментальная установка

При выполнении данной работы были выращены образцы КРТ с профилем состава, показанным на рис. 2, *a*. В нашем распоряжении были структуры после роста; после отжига в режиме 260°C, 3 ч; после отжига в режиме 290°C, 1 ч. Кроме того, мы исследовали эти структуры и для случая стравленного поверхностного широкозонного слоя CdTe (около 0.1 мкм, справа на рис. 2, *a*).

В нашем распоряжении были также структуры, состав которых изображен на рис. 2, *b*: после роста, после отжига в режиме 250°C, 3 ч. Кроме того, мы исследовали эти структуры и для случая стравленного поверхностного широкозонного CdTe. Ширина запрещенной зоны для активного слоя КРТ (в центральный „яме“) в таких структурах соответствует длине волны излучения около 2.81 мкм (определено при комнатной температуре $T = 300$ К по границе фотопроводимости). Отличительной особенностью последних структур оказалось то, что для них стимулированное излучение при комнатной температуре $T = 300$ К наблюдалось на длине волны 2.5 мкм (а также на длинах волн, чуть меньших и несколько больших, в зависимости от интенсивности оптической накачки) и только из структур после отжига в режиме 250°C, 3 ч. В структурах же после роста (без

отжига) при комнатной температуре нами наблюдалось только спонтанное излучение. Это показывает, что режим отжига гетероструктур может быть принципиально важен для создания лазерных структур.

Спектры излучения при оптической накачке исследовались нами с помощью экспериментальной установки, в которой использовалась оптическая накачка на основе лазера LS-2137 — лазера с электрооптической модуляцией добротности на кристаллах $\text{YAG}:\text{Nd}^{+3}$ с преобразованием длины волны излучения. Этот лазер позволяет осуществлять перестраиваемую импульсную накачку на частотах 400–2500 нм. Другие параметры лазера LS-2137: частота повторения импульсов 10 Гц, длительность импульса излучения 6–8 нс. Использование этой установки позволило нам осуществлять перестраиваемую по частоте импульсную накачку полупроводниковых гетероструктур и исследовать особенности коэффициента поглощения в них на разных частотах.

3. Экспериментальные результаты

3.1. Спектры стимулированного излучения

При интенсивностях накачки выше пороговой для структур типа изображенных на рис. 2, *a* наблюдалось стимулированное излучение на длине волны несколько больше 2 мкм, ширина спектральной линии которого составляла, как правило, 1.5–2%. Это спектральное уширение мы связываем с пространственной неоднородностью состава, присутствующей в исследованных образцах. Анализ стимулированного излучения из этих структур при различной интенсивности накачки и длине волны накачки показал, что наибольшая интенсивность стимулированного излучения наблюдается, как правило, на образцах, отожженных в режиме 260°C, 3 ч, на которых присутствовал тонкий поверхностный слой CdTe (как в случае, изображенном на рис. 2, *a*). Наличие поверхностного слоя, по-видимому, важно, так как широкозонный поверхностный слой приводит, как известно, к увеличению времени жизни неравновесных носителей в таких структурах. Ширина запрещенной зоны для активного слоя КРТ в таких структурах толщиной 0.6 мкм соответствует длине волны излучения около 2 мкм (определено при комнатной температуре $T = 300$ К по границе фотопроводимости).

Использование тонких слоев КРТ (с толщиной активного слоя приблизительно 0.5–1 мкм) обеспечивает хорошую прокачку структурой волной оптической накачки. В настоящее время использование структур с активным слоем толщиной около 0.6 мкм и несколько более тонких структур (толщиной около 0.2 мкм) дало возможность получить с помощью гетероструктур на основе КРТ стимулированное излучение при комнатной температуре на длинах волн 2 и 2.5 мкм соответственно. На рис. 3 приведены спектры стимулированного излучения для описанных структур КРТ 081105-1 (рис. 3, *a*) и КРТ 081114-1 (рис. 3, *b, c*) при комнатной температуре

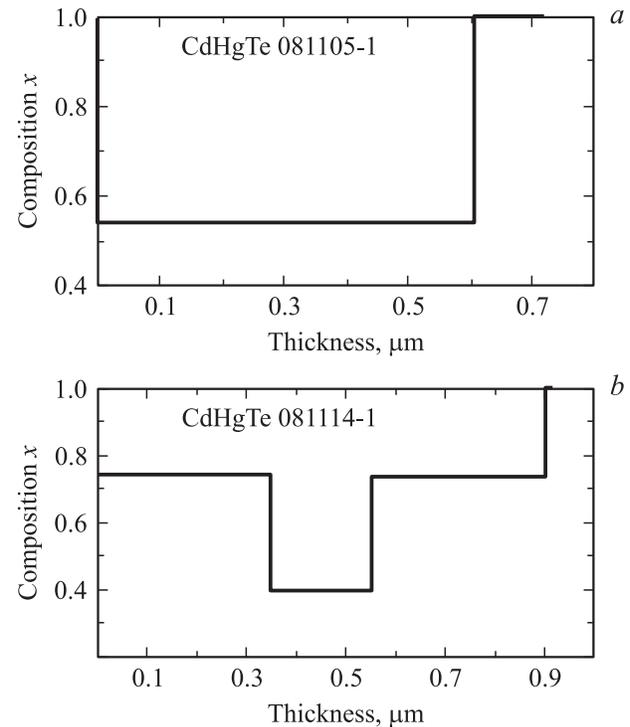


Рис. 2. Пространственные профили структур. *l* — изменение состава x по толщине пленки: *a* — КРТ 081105-1, *b* — КРТ 081114-1. Координата по оси абсцисс отсчитывается от буферного слоя CdTe, нанесенного на подложку GaAs.

$T = 300$ К. Спектры для образца КРТ 081114-1 после отжига 250°C, 3 ч демонстрируют, что нам удалось наблюдать стимулированное излучение из КРТ-структур при комнатной температуре на длине волны 2.5 мкм (рис. 3, *b, c*). О подобных результатах, насколько нам известно, в литературе не сообщалось. Предыдущий „рекордный“ результат соответствует длине волны излучения 1.7 мкм при комнатной температуре и принадлежит также авторам данной статьи (см. [11,12]). Следует отметить, что стимулированное излучение всегда возникает на длине волны, несколько меньше, чем длина волны, соответствующая ширине запрещенной зоны (она может быть определена по порогу фотопроводимости). Так, например, для образцов, демонстрирующих стимулированное излучение на длине волны 2.5 мкм, длина волны, соответствующая ширине запрещенной зоны, составляет 2.81 мкм. Такое отличие связано с тем, что, как известно, вероятность излучения пропорциональна произведению плотности состояний в зоне и фактору заполнения энергетических уровней (функции распределения носителей в зоне). Фактор заполнения энергетических уровней максимален на дне зоны проводимости, но при этом плотность состояний там близка к нулю.

Важно отметить, что толщина активного слоя в образце КРТ 081114-1 составляет около 0.2 мкм (см. рис. 2, *b*). Этот активный слой оказывается уже несколько тоньше, чем характерная глубина поглощения волны накачки, и накачка используется в этом смысле неэффективно.

Исследование структур КРТ 081114-1 позволяет сделать вывод о том, что образцы со слишком тонкими активными слоями также не являются оптимальными для полу-

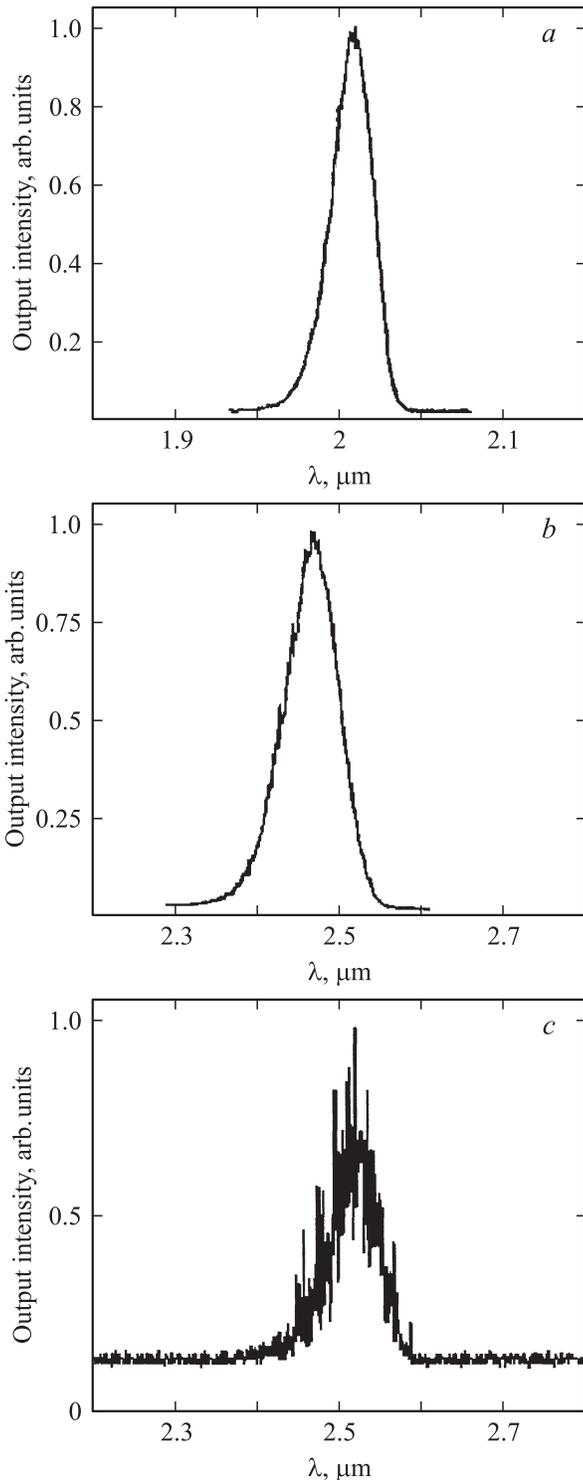


Рис. 3. Спектры стимулированного излучения при оптической накачке на длине волны 650.7 нм, при комнатной температуре $T = 300$ К для различных структур и интенсивностей накачки: *a* — для КРТ 081105-1, *b* — для КРТ 081114-1, *c* — для КРТ 081114-1, интенсивность накачки меньше, чем в случае *b*.

чения стимулированного излучения. По этой причине, в частности, стимулированное излучение было получено из структур КРТ 081114-1 только при оптимальных условиях отжига (3 ч при температуре 250°C). Для достижения в них достаточного усиления и стимулированного излучения оказывается необходимым увеличить интенсивность оптической накачки (чтобы увеличить общее число фотовозбужденных носителей). Это приводит в свою очередь к увеличению концентрации электронов и их квазиуровня Ферми в зоне проводимости, что способствует уменьшению длины волны стимулированного излучения. Отметим, что спонтанное излучение при этом всегда возникает начиная с длины волны, соответствующей ширине запрещенной зоны (в данном случае 2.81 мкм).

Интересно сравнить между собой спектры *b* и *c* на рис. 3, полученные для одного и того же образца КРТ 081114-1 при разных интенсивностях накачки. Спектр *c* соответствует интенсивности, немного больше пороговой. Нестабильность интенсивности накачки в наших экспериментах составляла около 5%. Она проявляется в виде „шумов“ на спектральных зависимостях (особенно сильно это проявляется при интенсивности накачки вблизи пороговой для возникновения стимулированного излучения — см. рис. 3, *c*). На рис. 3, *c* видны сильные флуктуации сигнала, тогда как при большей интенсивности (случай *b*) относительная величина флуктуации сигнала существенно меньше (абсолютная величина сигнала в этом случае больше). Причем для случая *b* длина волны излучения, соответствующая максимуму, несколько меньше, что обусловлено, по видимому, большей концентрацией фотовозбужденных электронов, а потому — большей величиной квазиуровня Ферми для электронов в зоне проводимости.

Следует также отметить, что для образца КРТ 081114-1 (см. схему на рис. 2, *b*) после роста (без отжига образца) наблюдалось только спонтанное излучение при комнатной температуре. Следовательно, режим отжига образцов весьма важен для получения стимулированного излучения (по крайней мере в этом диапазоне длин волн). Наличие большого коэффициента усиления в исследуемых гетероструктурах, а также существующие возможности дополнительной оптимизации образцов дают надежду на возможность дальнейшего продвижения в длинноволновую область. Это представляет в свою очередь большой интерес с прикладной точки зрения, так как уже при небольшом продвижении в длинноволновую область есть шанс продвинуться до диапазона окна атмосферной прозрачности 3–5 мкм.

3.2. Измерение коэффициента усиления

Нами были выполнены также исследования коэффициента усиления в таких системах. Знание коэффициента усиления, которое реализуется в активной среде, довольно важно для получения стимулированного излучения и для оценки возможности создания лазеров.

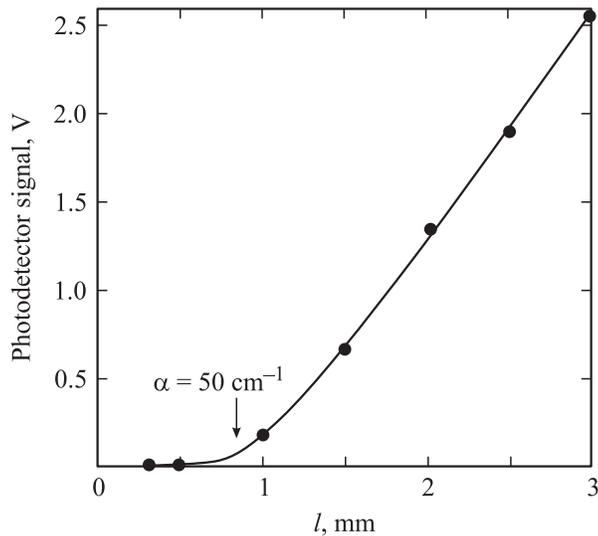


Рис. 4. Зависимость сигнала стимулированного излучения на фотоприемнике (на длине волны около 2 мкм) из образца КРТ 081105-1 от длины полоски засветки l при $T = 300$ К. При длине засветки около 1 мм коэффициент усиления оставляет около 50 см^{-1} .

Для определения коэффициента усиления мы использовали методику засветки узких полос с изменением их длины. Похожая идея была описана в работе [13]. Проводя измерения такого типа, особенно важно иметь в виду, что оценка величины коэффициента усиления для таких систем дает довольно большие значения, до 10^2 см^{-1} . При оптической засветке в виде световой полоски, сформированной на пленке образца с помощью непрозрачного экрана, локальная температура во время засветки может довольно сильно повышаться (практически такое повышение температуры может составить десятки–сотни градусов, при разной интенсивности засветки). Это приводит к некоторому уменьшению ширины запрещенной зоны в области засвеченной полоски (во время импульса оптической накачки). А потому — к некоторому увеличению длины волны стимулированного излучения по сравнению с длиной волны на межзонных переходах в незасвеченной области. Вследствие этого, области образца, окружающие полоску засветки, оказываются прозрачными (непоглощающими) для возникающего стимулированного излучения. Поэтому стимулированное излучение может свободно распространяться по всему образцу и отражаться от его границ. С этим обстоятельством как раз и связаны трудности исследования коэффициента усиления в таких системах. Дело в том, что в случае больших значений коэффициента усиления при его измерении важно избежать зеркальных отражений от всех возможных границ, т.е. добиться возникновения „чисто“ стимулированного излучения в среде, и избежать влияния границ.

С учетом этих требований исследование коэффициента усиления в КРТ-структурах мы проводили с помощью следующей экспериментальной схемы. Для

исследования использовались образцы довольно большого размера (с линейными размерами до 10 мкм). Для того чтобы избежать зеркального отражения волн от границ образца, края образца искусственно делались шероховатыми и с некоторым „скосом“ пленки и подложки (около 45°) на краю. С помощью непрозрачных экранов на таком образце формировались световые полоски засветки шириной 100–300 мкм и различной длины, обычно от 0.5 до 7–10 мм. Возникающие в таких полосках спонтанное и стимулированное излучения могут легко выходить из образца даже в том случае, если торец полоски засветки находится не на краю образца. На рис. 4 приведена зависимость интенсивности стимулированного излучения от длины засветки полоски l для образца КРТ 081105-1 (для него частота стимулированного излучения составляла около 2 мкм, см. рис. 3, а) с помощью описанной методики. Оценки показывают, что максимальное значение коэффициента усиления достигается при тех длинах засветки, при которых характер излучения меняется от спонтанного к стимулированному (в данном случае эта длина составляет около 1 мм). Оценки показывают (оценка состоит просто в нахождении показателя экспоненты в предположении экспоненциального роста стимулированного излучения), что для исследованных образцов КРТ максимальные значения коэффициента усиления достигают 50 см^{-1} при комнатной температуре.

4. Заключение

Полученные экспериментальные данные являются первыми результатами по наблюдению стимулированного излучения в диапазоне длин волн 2–2.5 мкм при комнатной температуре из КРТ-структур. Измеренные при этом значения коэффициента усиления в активной среде являются весьма большими и доходят, в случае длины волны излучения 2 мкм, до значений 50 см^{-1} , что позволяет надеяться на возможность дальнейшего продвижения в длинноволновую область при изготовлении соответствующих структур. Следует отметить, что даже не слишком существенное увеличение длины волны (до длин волн, больших 3 мкм) в данном случае может привести к важным прикладным следствиям. Дело в том, что в области длин волн 3–5 мкм находится окно атмосферной прозрачности, и сдвиг рабочей частоты в эту область может позволить создать активные устройства (лазеры) ИК диапазона при комнатной температуре, атмосфера Земли для которых будет прозрачной.

Данная работа поддержана грантами РФФИ № 07-02-00935-а, 09-02-00478-а; программой РАН „Проблемы радиофизики“; программой фундаментальных исследований ОФН РАН № III.7 „Физические и технологические исследования полупроводниковых лазеров, направленные на достижение предельных параметров“; грантом научной школы НШ-2786.2008.2.

Список литературы

- [1] R. Dornhaus, G. Nimtz. Springer Tracts in Mod. Phys., **78**, 1 (1978).
- [2] Ю.Г. Сидоров, С.А. Дворецкий, В.С. Варавин, Н.Н. Михайлов, М.В. Якушев, И.В. Сабинина, ФТП, **35** (9), 1092 (2001).
- [3] T.C. Hartman. J. Electron. Mater., **8** (2), 191 (1979).
- [4] В.И. Иванов-Омский, К.Е. Миронов, Р.Б. Рустамов, В.А. Смирнов. Письма ЖТФ, **10** (16), 1021 (1984).
- [5] K.K. Mahavadi, J. Bleuse, X. Chu, J.P. Faurie. Appl. Phys. Lett., **55** (13), 1285 (1989).
- [6] Ю.Н. Ноздрин, А.В. Окомельков, А.П. Котков, А.Н. Моисеев, Н.Д. Гришнова. Письма ЖТФ, **80** (1), 29 (2004).
- [7] Ю.Н. Ноздрин, А.В. Окомельков, А.П. Котков, А.Н. Моисеев, Н.Д. Гришнова. ФТП, **38** (12), 1419 (2004).
- [8] А.А. Андронов, Ю.Н. Ноздрин, А.В. Окомельков, В.С. Варавин, Р.Н. Смирнов, Д.Г. Икусов. ФТП, **40** (11), 1300 (2006).
- [9] A.A. Andronov, Yu.N. Nozdrin, A.V. Okomel'kov, A.A. Babenko, D.G. Ikuov, R.N. Smirnov, V.S. Varavin. Proc. SPIE, **6636**, 66 360U (2007).
- [10] А.А. Андронов, Ю.Н. Ноздрин, А.В. Окомельков, А.А. Бабенко, В.С. Варавин, Д.Г. Икусов, Р.Н. Смирнов. ФТП, **42** (2), 177 (2008).
- [11] А.А. Андронов, Ю.Н. Ноздрин, А.В. Окомельков, А.А. Бабенко, В.С. Варавин, Д.Г. Икусов, Р.Н. Смирнов. Прикл. физика, № 5, 98 (2008).
- [12] A.A. Andronov, Yu.N. Nozdrin, A.V. Okomel'kov, A.A. Babenko, V.S. Varavin, D.G. Ikuov, R.N. Smirnov. Proc. 10th Anniversary Int. Conf. on Transparent Optical Networks (ICTON 2008) (Athens, Greece, 2008) v. 1, p. 235.
- [13] L.D. Negro, P. Bettotti, M. Cazzanelli, D. Pacifici, L. Pavesi. Optical Communications, **229**, 337 (2004).

Редактор Т.А. Полянская

Stimulated emission at the wavelength 2.5 μm from optically excited structures $\text{Cd}_x\text{Hg}_{1-x}\text{Te}$ at room temperature

A.A. Andronov, Yu.N. Nozdrin, A.V. Okomel'kov,
A.A. Babenko*, V.S. Varavin*, D.G. Ikuov*,
R.N. Smirnov*

Institute for Physics of Microstructures,
Russian Academy of Sciences,
603950 Nizhny Novgorod, Russia

* Institute for Physics of Semiconductors,
Siberian Division of Russian Academy of Sciences,
630090 Novosibirsk, Russia

Abstract The main conditions for the CdHgTe structures optimization in order to receive more long length stimulated emission in the range 2–2.5 μm from epitaxial structures $\text{Cd}_x\text{Hg}_{1-x}\text{Te}$ at room temperature and optical pumping are reported. In our experiments, we have used $\text{Cd}_x\text{Hg}_{1-x}\text{Te}$ samples which have been grown on GaAs substrates by the Molecular Beam Epitaxy. The obtained experimental data are really first results of experimental observation of the stimulated emission in this wavelength interval a room temperatures in CdHgTe structures. The measured values of amplification coefficient in this active media are rather high, up to 50 cm^{-1} . It gives us real hope of further movement into the long wavelength region.