

ОСОБЕННОСТИ СПЕКТРАЛЬНОЙ ДИНАМИКИ ПИКОСЕКУНДНЫХ AlGaAs/GaAs ИНЖЕКЦИОННЫХ ЛАЗЕРОВ С МОДУЛЯЦИЕЙ ДОБРОТНОСТИ

П.П. Васильев

Впервые в инжекционном лазере обнаружено разбиение оптического спектра цуга пикосекундных импульсов на компоненты с расстоянием, превосходящим kT (200 см^{-1} при $\lambda = 855 \text{ нм}$ и $T = 300 \text{ К}$). Эффект может быть обусловлен комбинационным взаимодействием фотонов с фононами, коллективными возбуждениями в вырожденной электронно-дырочной плазме GaAs, а также с потоком дрейфующих носителей в активной среде лазера.

Предложенный в /1/ способ генерации ультракоротких импульсов (УКИ) в полупроводниковых лазерах и его реализация в многокомпонентном AlGaAs/GaAs гетеролазере с модуляцией добротности, генерирующем пикосекундные импульсы /2/, позволили получить рекордные для инжекционных лазеров значения пиковой мощности УКИ (10 Вт) и плотности мощности в активной среде ($4 \cdot 10^8 \text{ Вт/см}^2$). Последняя величина находится вблизи порога самофокусировки и ВКР для многих веществ. В работе /3/ наблюдалась самофокусировка и комбинационные частоты в усредненных оптических спектрах цугов пикосекундных импульсов, генерируемых такими лазерами. Однако осталось невыясненным, существуют ли спектральные компоненты одновременно или каждый импульс в цуге обладает своим, отличным от других, оптическим спектром. Для объяснения аномально большой ширины спектра генерации этих лазеров необходимо определить за какое время формируются спектральные компоненты и каково их число в каждом УКИ. Выяснению этих вопросов посвящена настоящая работа.

Экспериментальная установка схематически изображена на рис. 1. Излучение инжекционного AlGaAs/GaAs гетеролазера 1, активная область которого состоит из трех независимо накачиваемых частей (см. подробнее в /2/), коллимировалось микрообъективом 2 ЛОМО 60 X 0,85 и поступало на дифракционную решетку 600 лин/мм 3. Излучение, дифрагирующее в первый порядок, фокусировалось объективом 4 с фокусным расстоянием 135 или 180 мм на фотокатод электронно-оптической камеры "Агат-СФ" 5 с временным разрешением около 2 пс. При почти нормальном падении излучения лазера на решетку отклонение первого порядка дифракции при $\lambda = 855 \text{ нм}$ составило 32° . Методика позволяет получать динамические спектрограммы УКИ, т.е. развертку излучения лазера в плоскости (ω, t) /4/.

Накачка лазеров осуществлялась от генератора на лавинных транзисторах треугольными импульсами тока с фронтом 2,5 нс и шириной на половине амплитуды 8 нс. Максимальная амплитуда тока I , подаваемая на лазер, составляла 3 А, что соответствует 3-4-кратному превышению над порогом генерации $I_{\text{п}}$. На модулятор добротности (центральный электрод лазера на рис. 1) поступало запирающее напряжение $U = -(1 - 10) \text{ В}$. Наличие нелинейного поглотителя, связанного с усилителями лазера сильным электрическим полем и быстрым дрейфом носителей, позволяло получать 6 - 8 - кратные превышения концентрации неравновесных носителей над пороговой концентрацией перед излучением УКИ, хотя пороговый ток лазера в режиме модуляции добротности превосходил пороговый ток при однородной инжекции всех трех частей лазера лишь в 1,5 - 1,7 раза. В режиме модуляции добротности /1/ лазеры генерируют цуги УКИ с длительностью $5 \pm 2 \text{ пс}$ и частотой повторения импульсов в цуге от 1 до 18 ГГц в зависимости от соотношения поглощения и усиления в лазере. На рис. 2 представлены характерные для использовавшихся лазеров динамические спектрограммы при трех различных уровнях накачки. Начинается генерация во всех случаях с одной коротковолновой компоненты. В спектре импульсов, следующих за первым УКИ, появляются две компоненты с расстоянием $200 \pm 30 \text{ см}^{-1}$. На рис. 2а показана генерация лазером цуга УКИ с регулярно чередующимся спектром. В усредненном спектре излучения наблюдаются две компоненты с расстоянием $330 \pm 20 \text{ А}$ ($460 \pm 30 \text{ см}^{-1}$), однако видно, что эти компоненты существуют в разные момен-

ты времени (в разных импульсах цуга). Чередование компонент возникает через 800 пс после начала генерации и следует периодически с периодом около 800 пс. Обращает на себя внимание разная форма импульсов — нечетные (с длинноволновым спектром) вытянуты по оси t , четные (коротковолновые) — по оси ω . Это связано с тем, что дальняя зона излучения лазера различна для разных спектральных компонент. В статике, т.е. без развертки по времени t , на экране камеры "Агат" у длинноволновой компоненты наблюдались дополнительные боковые лепестки диаграммы направленности, а у коротковолновой — нет. При развертке излучения изображение каждого УКИ с длинноволновой компонентой представляет собой три горизонтальные полосы, соответствующие диаграмме направленности в статике. В результате все импульсы выглядят вытянутыми по оси времени (полосы на рис. 2а не разрешены и слились в одно пятно). Спектр коротковолновой компоненты шире, чем у длинноволновой, а диаграмма направленности состоит из одного лепестка. Причины появления описанной аномалии выясняются.

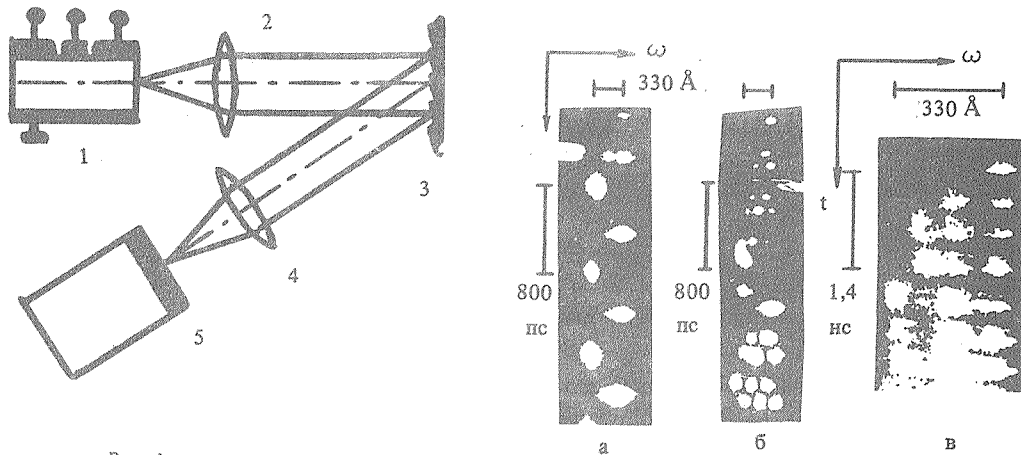


Рис. 1. Схема эксперимента.

Рис. 2. Динамические спектрограммы цуга пикосекундных импульсов при различных уровнях накачки лазера: а) $I = 2,4 I_{п}$, $U = -2,0$ В; б) $I = 2,4 I_{п}$, $U = -3,0$ В; в) $I = 3 I_{п}$, $U = -6,5$ В.

На рис. 2б, в показана ситуация, когда спектральные компоненты УКИ существуют в одни и те же моменты времени. На рис. 2б обращает на себя внимание свипирование спектра импульсов в цуге в длинноволновую сторону, а также появление спектральных компонент, сдвинутых на половину расстояния между ними в близко расположенных УКИ. Спектральное расстояние между компонентами составляет $160 \pm 20 \text{ \AA}$ ($220 \pm 30 \text{ см}^{-1}$). На рис. 2в видно как со временем увеличивается число компонент спектра. Расстояние между ними такое же, что и на рис. 2б. Максимальная ширина спектра в данном случае устанавливается через 1,5 нс после начала генерации. Анализируя экспериментальные данные на рис. 2, можно сделать вывод, что за формирование спектра лазера ответственны два процесса — "быстрый", связанный также с формированием длительности импульса (временной масштаб менее 5 пс), и "медленный" (сотни пикосекунд и более). На второй процесс может оказывать влияние нестационарность накачки, изменения которой происходят с той же скоростью.

Адекватное объяснение всех процессов, происходящих в используемых лазерах, усложнено следующими обстоятельствами. Наличие дополнительного сильного электрического поля вдоль оси резонатора лазера приводит к дрейфу электронно-дырочных пар и сильно возбуждает эту подсистему из-за конкуренции нагрева электронов и дырок и их термализации на дно зон. Кроме того, импульсный режим возбуждения лазера позволяет инжектировать в р-п переход носители с энергией, многократно превосходящей ширину запрещенной зоны, избыток которой при термализации носителей переходит в фонную подсистему. Огромная плотность мощности УКИ в активной области лазера и значительная величина нелинейной восприимчивости GaAs могут приводить к появлению нелинейно-оптических явлений, таких как

генерация второй гармоники, вынужденное комбинационное рассеяние и т.п. Например, вместе с УКИ основной частоты из лазера излучается импульс второй гармоники ($\lambda = 430$ нм), отчетливо наблюдаемый в усредненном сигнале даже при скважности УКИ около 10^6 .

Концентрация электронно-дырочных пар в активной области лазера перед излучением УКИ превосходит 10^{19} см $^{-3}$. Это — неравновесная электронно-дырочная плазма GaAs, в которой могут существовать коллективные возбуждения — оптические и акустические плазмоны. Причем для последних затухание Ландау мало, ибо плазма двухкомпонентная, и эффективная масса электрона на порядок меньше массы дырки /5/. Кроме того, в промежутках дрейфа, т.е. между поглотителем и усилителями лазера имеется поток дрейфующих электронов и дырок /2/. Скорость дрейфа близка к максимальной для GaAs (2–4) $\times 10^7$ см/с при электрических полях 10^3 – 10^4 В/см. Такой дрейф может сильно увеличивать сечение рассеяния фотонов на акустических плазмонах в вырожденной плазме GaAs /5/. отождествление физического механизма, ответственного за появление спектральных компонент с измеренными расстояниями 200 и 460 см $^{-1}$, затруднено следующими обстоятельствами: 1) наличием нескольких возможных физических процессов в активной области лазера (взаимодействие фотонов с фононами, плазмонами, дрейфующим потоком электронно-дырочных пар); 2) взаимодействием различных механизмов друг с другом, например, связывание плазмонов с фононами /5/, изменяющее резонансную частоту из взаимодействия с фотонами; 3) трудностью выделения одних факторов на фоне других из-за сильной ограниченности степеней свободы экспериментального воздействия на лазер вследствие специфики инжекционных лазеров (микроскопические размеры, зависимость от технологии изготовления и т.п.). Дальнейшие исследования, направленные на идентификацию физического механизма, ответственного за появление удаленных спектральных компонент, позволят объяснить особенности спектральной динамики пикосекундных импульсов инжекционных лазеров с модуляцией добротности.

Автор благодарен И.С. Голдобину за предоставление образцов лазерных диодов, а также Ю.П. Захарову за помощь в работе.

ЛИТЕРАТУРА

1. Васильев П.П., Голдобин И.С. Заявка на авторское свидетельство № 4102617/31-25 от 11.06.86., положительное решение от 23.10.87.
2. Васильев П.П., Голдобин И.С. Квантовая электроника, 14, 1317 (1987).
3. Васильев П.П. Квантовая электроника, 15, 1320 (1988).
4. Богатов А.П. и др. Сб. Квантовая электроника, М., Сов. радио, 1971, № 5, с. 93.
5. Платцман Ф., Вольф П. Волны и взаимодействия в плазме твердого тела. М., Мир, 1975, гл.5.

Поступила в редакцию 8 июня 1988 г.