

06.2; 06.3; 07

© 1993

ИССЛЕДОВАНИЕ ВНУТРЕННЕЙ ПОЛОСЫ МОДУЛЯЦИИ
УСИЛЕНИЯ $InGaAs/GaAs$ ИНЖЕКЦИОННЫХ ЛАЗЕРОВ
С НАПРЯЖЕННЫМ КВАНТОВОРАЗМЕРНЫМ
АКТИВНЫМ СЛОЕМ НА ЧАСТОТАХ ДО 75 ГГц

Г.Б. Венус, Е.Л. Портной,
Ю.М. Шерняков, Б.С. Явич

1. В в е д е н и е. Снижение пороговой плотности тока не является единственным преимуществом инжекционных гетеролазеров с напряженным активным слоем. Для таких лазеров также предсказывают существенное улучшение динамических параметров. Увеличение скорости модуляции излучения в лазерах с квантово-размерным (КР) активным слоем связывают с увеличением величины усиления и его производной по энергии вблизи уровней размерного квантования. Так, в КР лазерах ожидается двух-трех кратное увеличение полосы модуляции по сравнению с обычными гетеролазерами на двойной гетероструктуре [1], а наличие внутренних напряжений в КР слое может увеличить ширину полосы модуляции усиления еще примерно в два раза [2]. Вместе с тем эффекты насыщения усиления при больших световых потоках могут заметно уменьшать ширину полосы модуляции [3].

Сказанное выше делает весьма актуальным проведение экспериментальных исследований модуляционных характеристик инжекционных лазеров с напряженным КР активным слоем. Наиболее удобным объектом исследований являются лазеры на основе $InGaAs/GaAs$, в которых в случае КР активной области можно получить большие внутренние напряжения без образования дислокаций. В последние годы в ряде исследовательских групп была продемонстрирована возможность прямой модуляции $InGaAs/GaAs$ КР лазеров на частотах около 20 ГГц. В сентябре 1992 года появилось сообщение о рекордной полосе модуляции 30 ГГц, полученной на лазерах данного типа [4]. При этом измеренные значения полосы ограничиваются не внутренними свойствами активного слоя, а паразитными элементами цепи высокочастотной модуляции.

В настоящее время представляется необходимой оценка предельно достижимой внутренней полосы модуляции усиления в $InGaAs/GaAs$ лазерах с напряженным КР активным слоем методами, прямо не связанными с подачей на исследуемую структуру сверхвысокочастотного сигнала. Определение возможной полосы модуляции лазеров на основе структуры $InGaAs/GaAs$ является нашей основной целью при проведении данной работы.

2. Экспериментальные образцы и методы исследования. В наших исследованиях

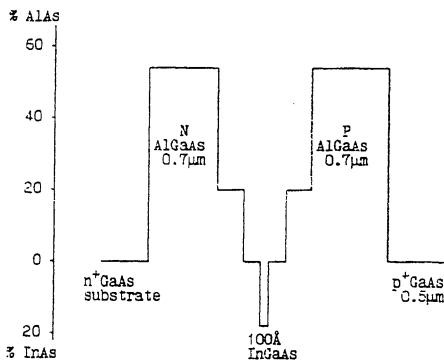


Рис. 1. Профиль изменения состава по толщине структуры $InGaAs/GaAs$.

использовались лазерные структуры с одиночным квантоворазмерным слоем и отдельным электронным и оптическим ограничением (SQW SCH). Они были выращены методом MOC-гидридной эпитаксии при пониженном давлении в горизонтальном реакторе с использованием $Ga(CH_3)_3$, $Al(CH_3)_3$, $C_2H_5(CH_3)_2In$, AsH_3 , $(C_5H_5)_2Mg$ и SiH_4 в качестве основных и лигирующих соединений соответственно. Профиль изменения состава по толщине структуры схематично показан на рис. 1. На поверхности полученных структур методом плазменно-химического травления формировались полоски шириной 5 мкм и высотой 1 мкм, которые планаризовались с помощью полиимеда. Монтаж лазеров осуществлялся путем пайки кристаллов к медному теплопроводу р-стороной вниз.

Для исследования динамики излучения лазерные диоды накачивались импульсами тока длительностью 0,5–3 нс при крутизне фронта 0,2–0,8 нс. При токах накачки, превышающих порог генерации менее чем на 6 дБ, излучение лазера было локализовано в нулевой моде и не имело четко выраженной структуры релаксационных пиков при возникновении генерации. При более высоких уровнях накачки картина ближнего поля полностью сохранялась, однако возник устойчивый пиковый режим генерации. Возможность получения такого режима связана с модуляцией добротности насыщения поглощения в областях распределенной меза-структуры. Такие поглощающие области могут возникать в полосковых лазерах, полученных глубоким травлением, благодаря повышенной скорости безизлучательной рекомбинации на травленных стенках активного слоя лазерного диода. Увеличение скорости рекомбинации на стенках приводит к изменению градиента концентрации неравновесных носителей и изменению усиления в поперечном сечении полоска вплоть до обратного знака. При увеличении интенсивности света может происходить насыщение поглощения и модуляция добротности.

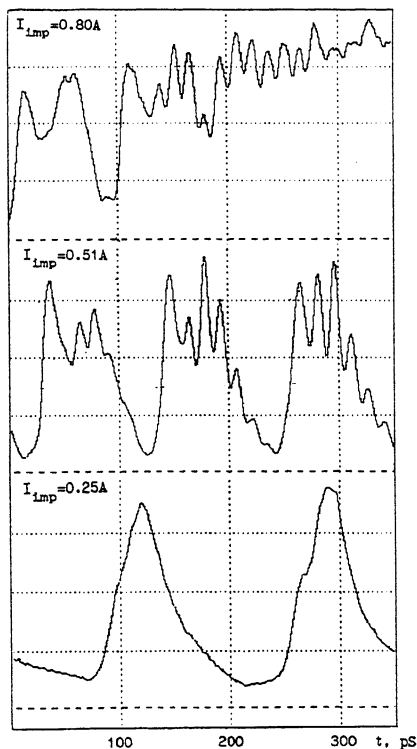


Рис. 2. Временные зависимости интенсивности излучения $InGaAs/GaAs$ лазерного диода с напряженным квантоворазмерным слоем при различных токах накачки.

Регистрация временных зависимостей изменения лазерных диодов проводилась с помощью стрик-камеры фирмы "Hamamatsu" (модель C1570-01) с временным разрешением 1.8 пс. Были приняты специальные меры для прецизионной синхронизации запуска лазера с синхронизацией развертки, позволяющие получить минимальную величину джиттера. Суммарное временное разрешение используемой системы было не хуже, чем 2.5–3 пс. Для регистрации спектральных зависимостей с временным разрешением использовался монохроматор МДР-12 с обратной дисперсией 2.4 нм/мм, который располагался непосредственно перед входной щелью стрик-камеры. В этих экспериментах результирующее временное разрешение системы с использованием монохроматора составило 6 пс, а спектральное разрешение – 2 Å.

3. Экспериментальные результаты и их обсуждение. На рис. 2 представлены измеренные с помощью стрик-камеры временные зависимости интенсивно-

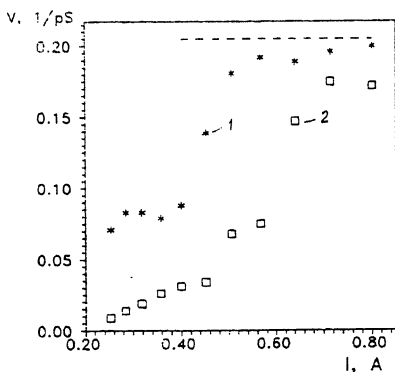


Рис. 3. Зависимость времени нарастания (1) и спада (2) световых импульсов при различных токах накачки (регистрация проводилась по уровню 0,1–0,9; пунктирной линией показано время нарастания синусоидального сигнала с частотой 75 ГГц).

сти излучения лазерного диода при различных уровнях накачки. При токах $I_{imp} < 0,35$ А частота следования световых пиков плавно увеличивается, однако их форма при этом не изменяется. При токах накачки выше 0,4 А внутри световых импульсов возникают осцилляции интенсивности излучения на частоте в районе 75 ГГц, а крутизна их переднего и заднего фронта значительно возрастает (рис. 3).

Такие изменения наблюдаются нами впервые на КР напряженных структурах и они не являются характерными для обычных ДГС и КР инжекционных лазеров, работающих в режиме модуляции добротности. Длительность импульсов света генерируемых $InGaAs/GaAs$ ($\tau \sim 50$ пс) и отсутствие изменения во времени нарастания импульса по сравнению с уменьшением времени спада для токов накачки в пределах $0,2 \text{ А} < I_{imp} < 0,35 \text{ А}$ (рис. 3) свидетельствует о том, что мы имеем дело с весьма медленным поглотителем. Следовательно, высокочастотные колебания не могут быть связаны с пассивной синхронизацией мод, когда времена восстановления поглотителя должны быть меньше времени прохода резонатора. С другой стороны, сопоставление полученных нами экспериментальных результатов с результатами для лазеров, помещенных во внешний резонатор [6, 7], позволяет сделать заключение, что осцилляции интенсивности излучения на частоте 75 ГГц можно объяснить автомодуляцией усиления на частотах биений продольных мод в резонаторе Фабри–Перо нашего лазерного диода $\nu = \sigma_g / 2L$, где σ_g – групповая скорость в волноводе лазера, L – длина резонатора.

Возникновение автомодуляции усиления на частоте биений двух продольных мод резонатора должно сопровождаться существенным сужением спектра генерации. Такой трансформации спектров для

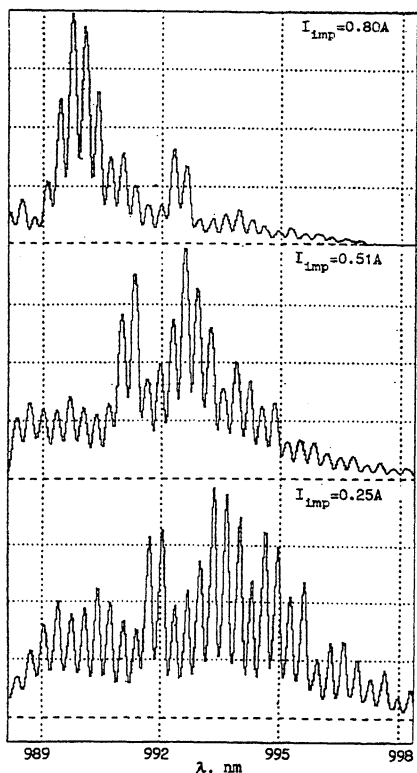


Рис. 4. Спектры генерации *InGaAs/GaAs* лазерного диода с напряженным квантоворазмерным слоем при различных токах накачки.

ДГС и КР инжекционных лазеров, работающих как в режиме автомодуляции, так и в режиме пассивной синхронизации мод, ранее не наблюдалось. Для инжекционных лазеров с КР напряженным активным слоем полученные спектральные зависимости однозначно свидетельствуют о сужении спектра генерации при переходе в режим автомодуляции. Представленные на рис. 4 спектры излучения *InGaAs/GaAs* лазеров регистрировались в те же самые временные моменты и при одинаковых токах накачки, как хронограммы импульсов света на рис. 2.

Как известно, полоса модуляции усиления в полупроводниковом лазере определяется частотой релаксационных колебаний, которая записывается известным соотношением [7]:

$$f_T = \frac{1}{2\pi} \frac{A\rho_0}{\tau_p},$$

где τ_p - время жизни фотонов в резонаторе, связанное с полными оптическими потерями $\tau_p = 1/cg(\alpha + 1/L \ln 1/R)$, α - распределенные оптические потери, $1/L \ln 1/R$ - потери на выход излучения при коэффициенте отражения зеркал R ; ρ_0 - стационарная плотность фотонов в резонаторе, определяемая уровнем накачки; A - дифференциальное усиление. Из всех приведенных выше параметров непосредственно от свойств материала активной области зависит величина дифференциального усиления. С нашей точки зрения, существенное отличие в поведении на высоких частотах наших лазеров с напряженным КР активным слоем от лазеров с активным слоем из объемного полупроводника вызвано его особенностями. Наблюдаемая в наших экспериментах автомодуляция на частотах порядка 75 ГГц требует очень высокого значения коэффициента дифференциального оптического усиления. Трудно ожидать, что необходимые значения коэффициента A могут быть получены во всей стационарной полосе усиления. Скорее всего, требуемые значения A будут достигнуты для энергий, связанных с переходами между уровнями размерного квантования электронов и дырок, следовательно, в режиме автомодуляции отчетливо выраженные особенности в спектре генерации будут связаны именно с этими переходами.

Авторы благодарят И.В. Кочнева и А.Е. Дулькина за участие в изготовлении лазерных диодов, Е.А. Аврутина за полезные дискуссии.

С п и с о к л и т е р а т у р ы

- [1] A r a k a w a Y., V a h a l a K., Y a r i v A. // Appl. Phys. Lett. 1984. V. 45 (9). P. 950-952.
- [2] L e s t e r L.F., O f f s e y S.D. et al. // Appl. Phys. Lett. 1991. V. 59 (10). P. 1162-1164.
- [3] P o r t n o i E.L., A v r u t i n E.A., C h e l n o k o v A.V. // AIP Conference Proceeding. N 240. 1991. P. 58-66.
- [4] R a l s t o n J.D., W e i s s e r S. et al. // Post-Deadline Papers. 13th IEEE International Semiconductor Laser Conference. 1992. P. 9-10.
- [5] K u z n e t s o v M., T s a n g D.Z. et al. // Appl. Phys. Lett. 1987. V. 51 (12). P. 895-897.
- [6] S a n d e r s S., Y a r i v A. et al. // Appl. Phys. Lett. 1991. V. 58 (7). P. 681-683.
- [7] L a u K.Y., Y a r i v A. // IEEE J. of Quant. Electron. 1985. V. QL-21 (2). P. 121-138.