

06.3; 07

© 1992

ПОЛУПРОВОДНИКОВЫЙ ИСТОЧНИК ПИКОВОСЕКУНДНЫХ
ИМПУЛЬСОВ НА ДЛИНЕ ВОЛНЫ 1.55 мкмЕ.И. Андреев а, А.С. Ш е р б а к о в,
И.Э. Б е р и ш е в, Ю.В. И л ь и н,
И.С. Т а р а с о в

Полупроводниковые лазеры обладают широкой линией усиления (около $\Delta\nu \sim 10^{13}$ Гц), что при использовании техники активной синхронизации мод дает возможность получать импульсы с длительностью $\tau \sim 1/\Delta\nu$, лежащей в пикосекундном диапазоне [1-3]. Активная синхронизация мод позволяет формировать хорошо повторяющиеся от импульса к импульсу устойчивые последовательности волновых пакетов, что и было осуществлено в перечисленных работах посредством периодической модуляции усиления активной среды введением в ток инжекции переменной составляющей с частотой равной или кратной спектральному интервалу между продольными модами лазера с внешним резонатором. В [2, 3] такой режим получен на длине волны 1.32 мкм с лазером с просветлением одной из граней как в открытом, так и в волоконном резонаторах, а в [1] изложены результаты создания источника сверхкоротких импульсов на 1.55 мкм, но с непросветленным лазером и с открытым внешним резонатором. Целью данной работы являлось достижение режима активной синхронизации мод просветленного на одном из торцов полупроводникового *InGaAsP* гетеролазера с внешним волоконным резонатором на длине волны 1.55 мкм и, таким образом, создание макета источника непрерывной последовательности мощных пикосекундных импульсов, пригодного для экспериментов с оптическими солитонами в одномодовых волоконных световодах.

В установленном режиме активной синхронизации мод импульсы самовоспроизводятся после каждого прохода резонатора, но восстановление формы импульсов обусловлено свойствами активной среды, так что из-за наличия в ней дисперсии, необходимым условием воспроизводимости импульсов является chirp частоты. Уже известные [4] механизмы взаимодействия оптических импульсов с полупроводниками позволяют построить модель формирования сверхкороткого импульса вида: $E(t) = A(t) \exp(i\omega_0 t) + \text{к. с.}$ при прохождении гетероструктуры. В процессе активной синхронизации мод в приближении слабого изменения усиления за счет истощения стимулированным излучением получают импульсы с гауссовой огибающей

$$A(t) = A_0 \exp\left(-\frac{t^2}{2\tau^2} + i\omega t\right), \quad (1)$$

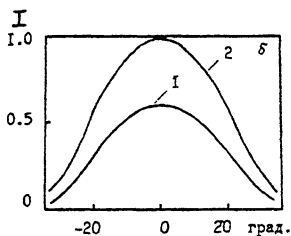
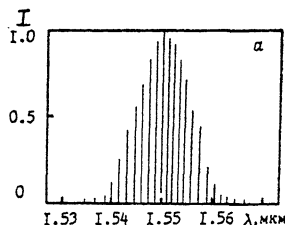


Рис. 1. Зависимость интенсивности излучения I от длины волны λ в непрерывном режиме генерации при токе накачки i , вдвое превышающем пороговое значение $i = 2i_n$ (а) и диаграмма дальнего поля в плоскости, параллельной плоскости р-п-перехода: 1 - $i = i_n$, 2 - $i = 2i_n$ (б).

где A_0 - амплитуда импульса, τ - длительность импульса по уровню e^{-1} , b - чирп частоты. Длительность импульса по половинному уровню $\tau_0 = 2\sqrt{\ln 2} \tau$ определяется как

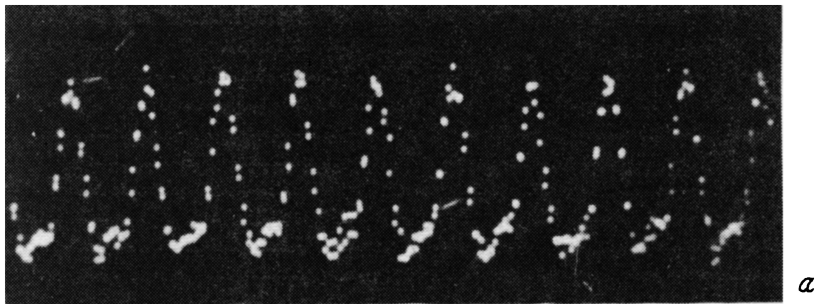
$$\tau_0 = 2\sqrt{\ln 2} (gm)^{-1/4} (\omega_m \omega_s)^{-1/2}, \quad (2)$$

где g - максимальная степень усиления при $t=0$; m - коэффициент модуляции потерь в резонаторе, ω_m - частота внешней модуляции, ω_s - ширина линии усиления. Чирп частоты может быть выражен как

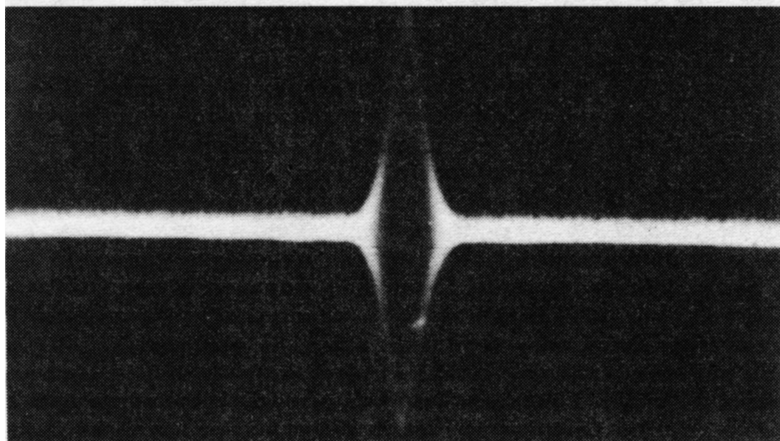
$$b = \frac{l \omega_m \omega_s^3 \sqrt{m}}{4 \left(g - \frac{\omega_0 T}{2Q}\right)^{3/2}} \cdot \frac{d^2 k}{d\omega^2}, \quad (3)$$

где l - длина высокодисперсионных элементов, например лазера; ω_0 - центральная частота излучения, Q - добротность резонатора, T - время прохода импульса по резонатору, k - волновое число. Соотношения (2) и (3) могут быть использованы для оценки параметров генерируемых импульсов.

Эксперименты по генерации непрерывной последовательности сверхкоротких оптических импульсов производились на лабораторном



a



b

Рис. 2. Непрерывная последовательность сверхкоротких оптических импульсов (а) и автокорреляционная функция той же последовательности (б) на длине волны 1.55 мкм.

стенде, позволяющем контролировать режим работы источника, а также регистрировать временные, спектральные, частотные и энергетические параметры импульсов. Для получения импульсов с наименьшей длительностью за счет синхронизации всех групп мод грань кристалла, обращенная в сторону внешнего волоконного резонатора, просветлялась нанесением SiO_2 -покрытия, так что коэффициент отражения не превышал 1%. Лазер с длиной волны 1.55 мкм был изготовлен на основе $InGaAsP/InP$ двойной гетероструктуры с отдельным электронным и оптическим ограничением зарощенной конструкции. Использование тонкой активной области 500–700 Å, заключенной в волновод общей толщиной 0.4 мкм, точно подобранного положения р-п перехода в гетероструктуре и специально разработанной технологии создания зарощенной мезаполосковой структуры позволило на длине волны 1.55 мкм достичь высокой (до 50 мВт) мощности в режиме непрерывной генерации [5]. На рис. 1 представлены спектр излучения в непре-

рывном режиме (а) и диаграмма дальнего поля излучения в плоскости, параллельной плоскости р-п перехода (б).

В ходе экспериментов были сформированы устойчивые непрерывные последовательности повторяющихся от импульса к импульсу сигналов с пиковой мощностью до 1.0 Вт. Исследования проводились с внешним волоконным кварцевым одномодовым резонатором длиной 4.5 метра, коэффициент связи которого с лазером составлял ~ 40 % при полном обходе резонатора (на двойной проход). Частота внешней синхронизации варьировалась в пределах 400-700 МГц, что позволяло удерживать в волоконном резонаторе одновременно до 32-х сверхкоротких импульсов. На рис. 2, а приведена осциллограмма непрерывной последовательности сверхкоротких импульсов с частотой повторения 570 МГц, зафиксированная с временным разрешением до 300 пс, а на рис. 2, б представлена зарегистрированная интерферометрическим методом автокорреляционная функция той же последовательности импульсов. Длительность импульсов по уровню половинной интенсивности равна 2.8 пс. Это измеренное значение можно сравнить с численной оценкой по формуле (2). Используя характерные для эксперимента величины: $\rho \approx 3$, $m = 0.25$, $\omega_m = 2\pi \cdot 570 \cdot 10^6$ рад/с и $\omega_s = 2\pi \cdot 10^{13}$ рад/с, получим оценку $\tau_0 = 3$ пс, что хорошо соответствует экспериментальному результату. Возникающий при установлении самовоспроизводящихся импульсов в источнике чирп частоты может быть оценен по формуле (3). Так, при $l = 500$ мкм, ω_0 ($\lambda = 1.55$ мкм) $= 1.8 \cdot 10^{15}$ рад/с, $\tau = 45 \cdot 10^{-9}$ с, $Q = 10^5$, $(d^2k/d\omega^2) = 3.7 \cdot 10^{-24}$ с²/м имеем $\delta = 7 \cdot 10^{18}$ с⁻². Это значение чирпа частоты не превышает допустимой для образования фундаментального солитона в кварцевом одномодовом волоконном световоде величины, которая для импульса с гауссовской огибающей оценивается соотношением $\delta = (\pi \tau^2)^{-1}$ [6] и составляет в данном случае величину $4 \cdot 10^{22}$ с⁻². Таким образом, полученные в полупроводниковом источнике с внешним волоконным резонатором непрерывные последовательности мощных сверхкоротких оптических импульсов на длине волны 1.55 мкм могут быть использованы в экспериментах с пикосекундными солитонами в протяженных одномодовых волоконных световодах.

В заключение авторы выражают благодарность А.Ю. Юркиной за помощь в подготовке экспериментов, а также Д.З. Гарбузову и В.Ю. Петрунькину за интерес к работе.

С п и с о к л и т е р а т у р ы

- [1] Петрунькин В.Ю., Сысоев В.М., Шербаков А.С. // Письма в ЖТФ. 1989. Т. 15. В. 16. С. 27-32.
- [2] Петрунькин В.Ю., Сысоев В.М., Шербаков А.С., Гарбузов Д.З., Ильин Ю.В., Тарасов И.С. // Письма в ЖТФ. 1989. Т. 15. В. 24. С. 64-68.

- [3] Князев И.А., Шербаков А.С., Ильин Ю.В., Рассудов Н.Л., Тарасов И.С. // Письма в ЖТФ. 1991. Т. 17. В. 3. С. 14-17.
- [4] Полупроводниковые инжекционные лазеры. Динамика, модуляция, спектры / Под ред. У. Тсанга. М.: Радио и связь, 1990. 320 с.
- [5] Verishev I.E., Garbuzov D.Z., Gorbachev A.Yu., Ilyin Yu.V., Ilyinskaya N.D., Saulich A.M., Rassudov N.L., Tarasov I.S. Powerfull continuous-wave InGaAsP/InP lasers for FOC (1550 nm, T=300 K, P=150 mW) // Proc. of the ISFOC-92 (St. Petersburg, October 5-9, 1992), Boston MA, USA, Information Gatekeepers, Inc. 1992. P. 146-148.
- [6] Белов М.Н. // Квантовая электроника. 1987. Т. 14. № 8. С. 1627-1629.

Поступило в Редакцию
15 ноября 1992 г.