

06.3;07

## **Получение режима модуляции добротности в лазерах на основе одинарной гетероструктуры и генерация сверхмощных пикосекундных оптических импульсов**

© Г.Б. Венус, И.М. Гаджиев, А.М. Губенко,  
Е.Л. Портной, А.А. Хазан

Физико-технический институт им. А.Ф. Иоффе РАН, С.-Петербург

Поступило в Редакцию 29 ноября 1996 г.

Режим модуляции добротности был получен для лазеров на основе одинарной гетероструктуры. Сверхбыстродействующий насыщающийся поглотитель в резонаторе лазера создавался методом имплантации тяжелых, высокоэнергетичных ионов. Пиковая мощность, полученная на лазерах с шириной полоска 150 мкм, составляет 380 Вт при длительности импульса генерации 40 пс.

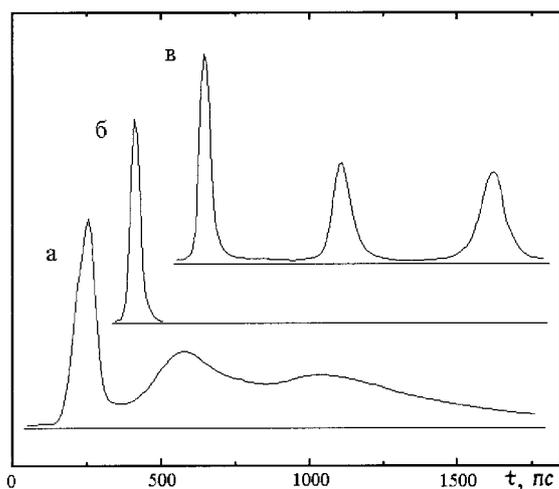
В последнее время область применения пикосекундных световых импульсов быстро расширяется, возникают новые направления, имеющие прикладную направленность, например лазерная маммография, лазерная дистанциметрия высокого разрешения. В этой ситуации требуется создание малогабаритных полупроводниковых источников световых пикосекундных импульсов, пиковая мощность которых приближается к мощности твердотельных лазеров. Высокая оптическая мощность пикосекундного импульса, которая является основным параметром для применений данного типа, требует конструкции полупроводникового лазера, значительно отличающейся от оптимальной конструкции мощного лазера, работающего в CW-режиме. В связи с этим целью данной работы являлся выбор такой конструкции диодного лазера, которая позволила бы получить новый уровень мощности светового пикосекундного импульса при работе лазера в режиме модуляции добротности.

В режиме модуляции добротности наиболее простым способом повышения выходной энергии оптических импульсов лазеров является увеличение накопленной энергии в резонаторе лазера до момента

открытия оптического затвора. В полупроводниковых лазерах накопленная энергия непосредственно связана с количеством неравновесных носителей в момент вскрытия насыщающегося поглотителя и глубиной модуляции концентрации носителей. Глубина модуляции определяется качеством насыщающегося поглотителя, введенного в резонатор полупроводникового лазера. Увеличение объема активного слоя приводит к росту количества неравновесных носителей в резонаторе лазера. При этом можно говорить как об увеличении физических размеров активного слоя, так и о увеличении объема активного слоя в энергетическом пространстве, т. е. об увеличении концентрации неравновесных носителей.

Традиционным путем увеличения объема активного слоя и связанного с этим повышения импульсной мощности является использование многосекционных QW-лазеров с широким страйпом сложной формы и с обратносмещенной секцией насыщающегося поглотителя [1,2]. Дальнейшее увеличение объема возможно за счет перехода от QW-структур к объемным материалам. При этом максимальная толщина активной области с сохранением генерации в нулевой моде может быть достигнута на лазерах, обладающих асимметричным волноводом. Из коммерческих лазеров, производимых сегодня, для данной цели лучше всего пригодны лазеры на основе одиночного гетероперехода (SH-лазеры), ширина активной области которых около 2 мкм. Аналогичные структуры уже использовались ранее при генерации мощных одиночных оптических импульсов в специализированных токовых и температурных режимах накачки [3,4].

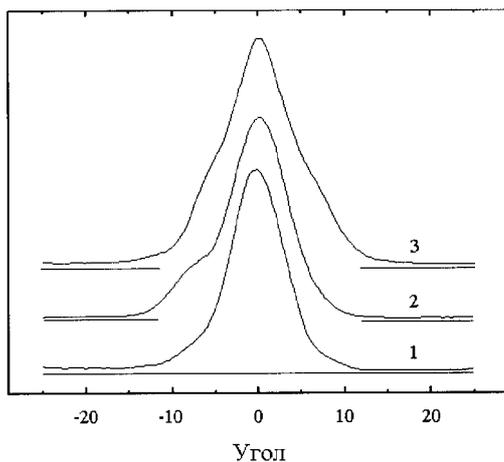
Для получения устойчивого режима модуляции добротности диодного лазера необходимо создание высокоэффективного насыщающегося поглотителя, что в случае SH-лазера не представляется возможным с использованием традиционных для QW-лазеров многосекционных конструкций с обратносмещенной секцией насыщающегося поглотителя. Одной из причин этого является недостаточное быстродействие полученного насыщающегося поглотителя, так как область объемного заряда не превышает 0.1 мкм и быстродействие определяется временем жизни неравновесных носителей в активном слое толщиной около 2 мкм, что составляет единицы наносекунд. Значительное увеличение его быстродействия возможно благодаря методу создания сверхбыстродействующего насыщающегося поглотителя с помощью имплантации высокоэнергетических тяжелых ионов, разрабатываемого нами в течение ряда лет [5,6]. Данная методика, с нашей точки зрения, дает наилучшие результаты именно на лазерах с объемным активным слоем, так как в



**Рис. 1.** Форма оптического импульса SH-лазера LD-62: *а* — до имплантации,  $I = 18.5 \text{ А}$ ; *б* — после имплантации ионами  $\text{N}^{4+}$  с энергией 17.6 МэВ и дозой  $1.5 \times 10^{11} \text{ см}^{-2}$ ;  $I = 1.3I_{th} = 18.5 \text{ А}$  и *в* —  $I = 2.7I_{th} = 38.4 \text{ А}$ .

этом случае кроме сверхмалых времен жизни в области поглотителя достигается также и максимальная глубина модуляции концентрации неравновесных носителей в активном слое. Новые уровни мощности пикосекундных оптических импульсов в режиме модуляции добротности были достигнуты нами благодаря применению данного метода к коммерческим SH-лазерам.

В наших экспериментах мы использовали диодные SH-лазеры LD-60, с шириной активной области 70 мкм, и лазеры LD-62, с шириной активной области 70 мкм, производимые фирмой LASER DIODE, INC. Их зеркала облучались различными типами ионов ( $\text{N}^+$ ,  $\text{O}^+$ ,  $\text{Ar}^+$ ) с энергиями 10–50 МеВ и дозами  $5 \times 10^{10}$ – $4 \times 10^{11}$  ионов/см<sup>2</sup>. При этом энергия каждого типа ионов выбиралась таким образом, чтобы глубина проникновения составляла величину не менее 6–8 мкм при длинах резонатора 350–400 мкм. Как показали наши предыдущие исследования, в этом случае имплантация тяжелыми ионами позволяет получить область сверхбыстродействующего насыщающегося поглотителя, который является устойчивым к оптическому отжигу [5].



**Рис. 2.** Изменение дальнего поля лазера в плоскости, параллельной плоскости  $p-n$  перехода для SH-лазеров страйповой конструкции в режиме генерации одного оптического импульса в зависимости от величины тока накачки: 1 —  $I = 1.1I_{th} = 7.8$  А,  $P_{opt} = 6.3$  Вт; 2 —  $I = 1.5I_{th} = 10.6$  А,  $P_{opt} = 24$  Вт; 3 —  $I = 1.9I_{th} = 13.5$  А,  $P_{opt} = 38$  Вт.

Кроме создания насыщающегося поглотителя в области зеркал имплантационная методика использовалась для формирования диаграммы направленности пикосекундных лазеров в плоскости, параллельной  $p-n$  переходу. Имплантация проводилась ионами азота с дозами облучения выше  $10^{12}$  ионов/см<sup>2</sup> в боковые стороны лазерных диодов LD-60 с шириной контакта 70 мкм. При этом энергии ионов (и соответственно их глубины проникновения в материал) подбирались таким образом, чтобы происходило формирование страйпа максимальной ширины, обеспечивающей устойчивую генерацию нулевой моды в волноводе с токовым ограничением во всем диапазоне однопикового режима.

Для получения пиковой генерации лазеры накачивались импульсами длительностью 2 нс с амплитудой до 50 А и частотой повторения до 100 кГц. После имплантации импульсный, пороговый ток возрастал в 2.2–3.1 раза в зависимости от дозы облучения, энергии и типов ионов. При облучении ионами N<sup>4+</sup> с энергией в 17.2 МэВ и дозами  $1.5 \times 10^{11}$  ионов/см<sup>2</sup> пороговые токи для LD-62 SH-лазера

(ширина области генерации 150 мкм) лежат в пределах 13.8–14.8 Å. Рис. 1 показывает изменения в форме оптического импульса SH-лазеров до и после имплантации. Из данной кривой видно, что нам удается достичь устойчивого Q-switching режима генерации SH-лазеров, несмотря на возможные ограничения, связанные с сильной асимметричностью волновода данных структур. Импульсная оптическая мощность в режиме генерации одного пика достигает 380 Вт для лазеров LD-62 (излучающая область 150 мкм) и 45 Вт для лазеров с нулевой модой при длительности импульсов в пределах 40–45 пс. Распределение дальнего поля в плоскости параллельной плоскости  $p-n$  перехода для лазеров с токовым ограничением, полученных имплантацией с боковых сторон по представленной выше методике, показано на рис. 2. Эффективная ширина области генерации, определенная из дифракционного предела, соответствует страйпу шириной 14 мкм.

Импульсная плотность мощности на зеркале для страйпового лазера составляет около 125 МВт/см<sup>2</sup>, а для лазеров с широкой областью генерации порядка 105 МВт/см<sup>2</sup>. Как показывают наши эксперименты, такие рекордно высокие плотности мощности излучения не приводят к разрушению зеркал исходных структур благодаря пикосекундной длительности световых импульсов. Создаваемый нами насыщающийся поглотитель также является устойчивым к оптическому отжигу при таких высоких плотностях мощности. Об этом свидетельствует полная воспроизводимость результатов измерений импульсной мощности, пороговых токов в области существования однопичкового режима для лазеров, проработавших несколько сотен часов.

Авторы благодарят коллектив Циклотронной лаборатории за облучение полупроводниковых лазерных структур.

Данная работа была поддержана в рамках гранта Российского фонда фундаментальных исследований № 96–02–17855.

## Список литературы

- [1] Zhu B., White I.H., Williams K.A., Laughton F.R. // IEEE Photonics Technology letters. 1996. V. 8. P. 503–505.
- [2] Jiang Z., Tsang H.K., Wang W., Wang Z., Wang X., Wang Q. // 15 th International Semiconductor laser Conference. 1996. Haifa, Israel, Th. 1.3. P. 159–160.

- [3] *Volpe F., Gorfinkel V., Sola J., Kotra G.* // Conference on Laser & Electro-Optics (CLEO-9). Anaheim, California USA, May 1994.
- [4] *Vainshtein S., Rossin V., Kilpela A., Kostamovaara J., Myllyla R., Maatta K.* // IEEE J. of Quantum Electron. 1995. V. 31. P. 1015–1021.
- [5] *Портной Е.Л., Стельмах Н.М., Челноков А.В.* // Письма в ЖТФ. 1989. Т. 15. В. 11. С. 44–48.
- [6] *Portnoi E., Avrutin E., Chelnokov A.V.* // Proceedings of the Joint Soviet-American Workshop on the Physics of Semiconductor Lasers. Leningrad, May 20–June 3, 1991. AIP Conference Proceedings no. 240. P. 58–66 (N.Y. 1991).