

Пикосекундные полупроводниковые лазеры с внешним волоконно-оптическим резонатором

Е.В.Андреева^{**}, В.К.Батоврин^{*}, М.Е.Липин^{*}, С.А.Магницкий^{**}, Е.Салик^{***},
Д.С.Стародубов^{****}, Дж.Файнберг^{****}, М.В.Шраменко^{*}, С.Д.Якубович^{*}

Исследован режим пассивной синхронизации мод многосекционных лазерных диодов на основе GaAlAs-гетероструктур. В качестве внешнего резонатора использовались отрезки одномодовых волоконных световодов с торцевым неселективным зеркалом или с волоконной брэгговской решеткой. При накачке постоянным током инжекции получены регулярные последовательности световых импульсов длительностью в единицы пикосекунд и пиковой мощностью в единицы ватт. Спектральные характеристики импульсов существенно зависят от параметров и настройки внешнего резонатора.

Ключевые слова: пассивная синхронизация мод, полупроводниковый лазер, волоконный световод.

Использование одномодовых волоконных световодов в качестве внешних резонаторов лазерных диодов (ЛД), работающих в режиме синхронизации мод, позволяет создать миниатюрные источники оптических УКИ. При этом зеркалами внешнего резонатора могут служить диэлектрические зеркала, наносимые на торец световода [1], или волоконные брэгговские решетки (ВБР), записываемые в его сердцевине [2]. В [1, 2] ЛД работали в режиме активной синхронизации мод. В настоящей работе, которая является продолжением работ [3, 4], исследуется пассивная синхронизация мод в аналогичных приборах, достигаемая за счет использования в качестве активного элемента многосекционного ЛД с нелинейным насыщающимся поглотителем.

В проведенных нами исследованиях применялись трехсекционные ЛД на основе двусторонней GaAlAs-гетероструктуры, подобные описанным в [5]. Разделительное сопротивление между центральной поглощающей секцией и усиливающими секциями, примыкающими к торцам ЛД, составляло около 3 кОм. На торцевые грани ЛД были нанесены высокоотражающее (ВОП) и просветляющее (ПП) диэлектрические покрытия с коэффициентами отражения свыше 95 % и менее 0.5% соответственно. Поглотитель был заземлен через сопротивление утечки $R_{\text{leak}} = 100$ Ом.

Нами исследовались внешние волоконные резонаторы различной конструкции (рис.1). В них использовались отрезки одномодового волоконного световода Lucom SM/800, на внешние торцы которых, полученные методом скола, было нанесено многослойное диэлектрическое покрытие ZrO_2/Al_2O_3 , обеспечивающее коэффи-

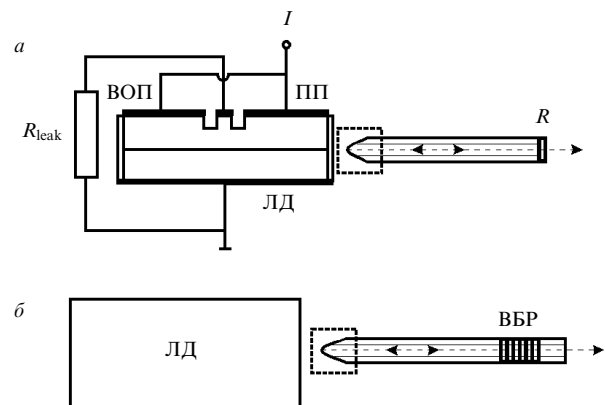


Рис.1. Трехсекционный ЛД с внешним волоконно-оптическим резонатором с торцевым диэлектрическим зеркалом (а) и волоконной брэгговской решеткой (б).

циент отражения $R = 22$ % на границе с воздухом и $R = 12$ % при стыковке с аналогичным световодом. В пределах спектральной полосы оптического усиления исследованных ЛД эти зеркала были практически неселективны. Кроме того, применялись отрезки германосиликатного одномодового световода фирмы «QPS Technology», в сердцевине которого были записаны ВБР. В отличие от ВБР, использованных в [4], эти решетки были записаны через специальную щелевую диафрагму, ограничивающую область облучения световода интерферирующими пучками УФ излучения. Протяженность решеток составляла около 0.3 мм. ВБР с резонансным отражением в спектральном диапазоне 850–860 нм, соответствующем области насыщения поглотителя ЛД, были как «узкополосными», с полушириной контура отражения $\Delta\lambda = 0.2 - 0.4$ нм, так и «широкополосными», с $\Delta\lambda = 2.0 - 4.0$ нм (рис.2,б). Их пропускание на резонансной длине волны составляло 70–85 %.

Для оптической стыковки излучающей области ЛД с сердцевиной волокна использовались торцевые микролинзы двух типов: сферические, образованные контролируемым оплавлением торца световода в пламени элект-

^{*}Московский государственный институт радиотехники, электроники и автоматики (технический университет), Россия, 117454 Москва, просп. Вернадского, 78; тел. (095) 434 72 47

^{**}Международный учебно-научный лазерный центр МГУ им. М.В.Ломоносова, Россия, 119899 Москва, Воробьевы горы

^{***}University of Southern California, 920 West 37 Str., Los Angeles, CA 90089

^{****}D-Star Technology Inc., 725 33 Str., Manhattan Beach, CA 90266; phone: (213)740 00 46; fax: (213)740 78 86; starodubov@d-startech.com

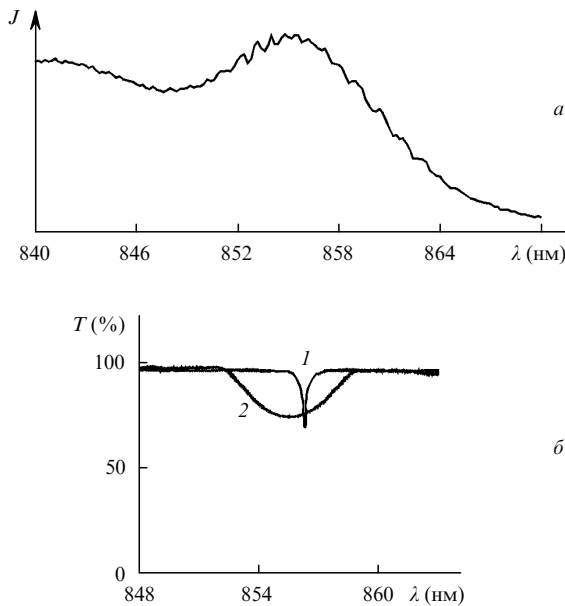


Рис.2. Длинноволновое крыло спектра суперлюминесценции ЛД без внешнего резонатора ($I = 140$ мА) (а) и спектры пропускания «узкополосных» (1) и «широкополосных» (2) ВБР (б).

рической дуги, и асферические, оптимизированные в соответствии с диаграммой направленности излучения исследованных ЛД и изготовленные прецизионной механической обработкой торца волокна. Сферические микролинзы, более простые в изготовлении и юстировке, обеспечивали коэффициент ввода излучения в световод около 35 %. Асферические микролинзы позволяли получить коэффициент ввода более 70 %. Длины отрезков волокон от торцевой линзы до торцевого зеркала или ВБР составляли 10 см, что отвечало частоте следования УКИ в режиме пассивной синхронизации мод внешнего резонатора (первая гармоника) около 1.0 ГГц.

При исследовании выходных характеристик лазера использовалась универсальная измерительная установка, описанная в [4]. На рис.3 представлены типичные ватт-амперные характеристики в режиме непрерывной инжекции тока, усредненные во времени спектры излучения и спектральные хронограммы генерируемых УКИ для ЛД с различными внешними волоконными резонаторами. Для сравнения на рис.3,а приведена соответствующая характеристика ЛД с объемным внешним резонатором, образованным широкоапертурным просветленным микрообъективом и плоским неселективным зеркалом ($R = 24\%$).

Как и следовало ожидать, неизбежные потери при вводе излучения в световод и затем из световода обратно в активную область ЛД приводят к повышению порога генерации и снижению внешней квантовой эффективности по сравнению со случаем объемного резонатора. Тем не менее для обеих волоконных схем получен устойчивый режим пассивной синхронизации мод внешнего резонатора (утолщенные части кривых $\bar{P} = f(I)$ на рис.3) в достаточно больших диапазонах токов накачки. Генерируемые УКИ представляют собой моноимпульсы длительностью в единицы пикосекунд и пиковой мощностью порядка 1 Вт. Использование асферических волоконных микролинз заметно снижает пороги генерации, повышает выходную мощность и расширяет диапазон устойчивой синхронизации мод (см. рис.3,б, в).

При использовании «узкополосных» ВБР генерируемые УКИ близки к спектрально ограниченным. При использовании «широкополосных» ВБР и неселективных торцевых зеркал импульсы приобретают ярко выраженный квазилинейный чирп. Такие импульсы могут быть в дальнейшем сжаты с помощью внешних временных компрессоров, в частности средствами чисто волоконной оптики. С этой целью волоконный выход лазера можно соединить с трехпортовым волоконным циркулятором, к среднему порту которого подключена ВБР со 100%-ным отражением и соответствующим линейным чирпом – линейной зависимостью периода решетки от координаты вдоль оси волокна. Кроме того, возможно использование подобных модулированных ВБР непосредственно во внешнем резонаторе с целью обеспечения внутррезонаторной коррекции чирпа.

С ростом тока инжекции и выходной мощности параметры УКИ обычно ухудшаются. Их длительность увеличивается, уровень флуктуаций растет; частота следования также увеличивается, причем это проявляется сильнее, чем в лазере с объемным внешним резонатором. Одной из причин этого является конкуренция процесса синхронизации мод с процессом автомодуляции интенсивности излучения, хорошо известным для ЛД с неоднородной инжекцией [5]. В использованных ЛД до нанесения просветляющего покрытия автомодуляция, характеризующаяся сильной зависимостью частоты пульсаций от уровня накачки, также наблюдалась. После высококачественного просветления торца она прекращалась – ЛД превращался в двухпроходный суперлюминесцентный диод (см. рис.2,а). Данную ситуацию осложняет слабое отражение от торцевых волоконных микролинз, располагаемых на расстоянии нескольких микрометров от просветленного торца ЛД. Это отражение приводит к

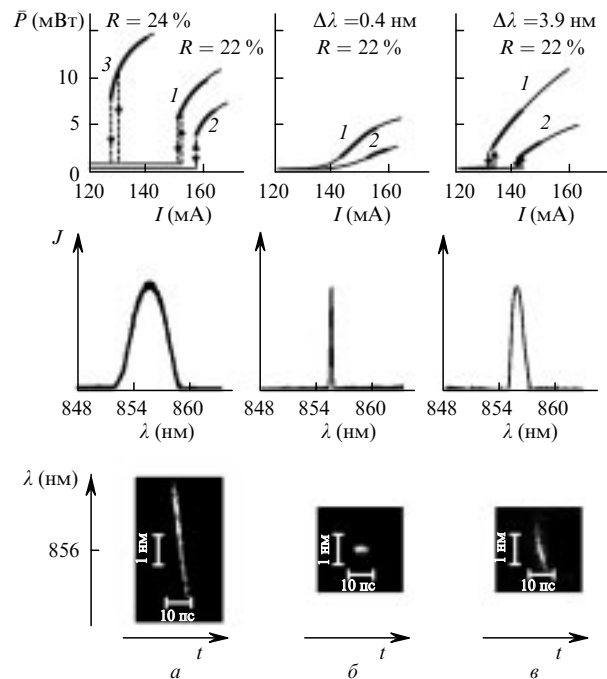


Рис.3. Типичные ватт-амперные характеристики (верхний ряд), усредненные во времени спектры излучения (средний ряд) и спектральные хронограммы генерируемых УКИ лазеров с неселективным внешним резонатором (а), а также с «узкополосной» (б) и широкополосной (в) ВБР; 1, 2 – волоконный резонатор с асферической и сферической линзами соответственно, 3 – объемный внешний резонатор.

возникновению составного резонатора, чем и можно объяснить наблюдаемые явления. Мы полагаем, что при просветлении волоконных микролинз может быть достигнуто заметное увеличение диапазона устойчивой синхронизации мод и выходной мощности.

Снижение выходной мощности ЛД с волоконным резонатором по сравнению с лазером с объемным внешним резонатором окупается возможностью создания миниатюрных монолитных модулей – генераторов УКИ. Такие устройства смогут найти самостоятельные практические применения, а также могут быть использованы в качестве задающих генераторов в системах с мощными полупроводниковыми оптическими усилителями бегущей волны [6, 7]. В этом случае можно рассчитывать на повышение уровня выходной мощности более чем на два порядка при сохранении компактности устройства.

Авторы благодарят В.Н.Пенкина за нанесение отражающих покрытий на световоды и О.А.Власенко за изготовление сферических волоконных микролинз.

1. Eisenstein G. et al. *IEEE J. Quantum Electron.*, **22**, 142 (1986).
2. Morton P.A. et al. *Photon.Techn.Letts*, **7**, 111 (1995).
3. Andreeva E. et al. *Techn.Proc.IEEE/LEOS'98 Ann.Meeting* (Baltimore, 1998, v.2, p.161).
4. Андреева Е.В. и др. *Квантовая электроника*, **26**, 103 (1999).
5. Батоврин В.К. и др. *Квантовая электроника*, **23**, 125 (1996).
6. Chafouri-Shiraz H. et al. *IEEE J. Sel.Top.Quantum Electron.*, **3**, 210 (1997).
7. Dagens B. et al. *IEEE J. Sel.Top.Quantum Electron.*, **3**, 233 (1997).

E.V.Andreeva, V.K.Batovrin, M.E.Lipin, S.A.Magnitskiĭ, E.Salik, D.S.Starodubov, J.Feinberg, M.V.Shramenko, S.D.Yakubovich. Picosecond semiconductor lasers with an external fibre resonator.

Passive mode locking regime of multi-section GaAlAs heterostructure laser diodes has been studied. Pieces of single-mode optical fibres with an edge nonselective mirror or a fibre Bragg grating have been used as an external cavity. Regular trains of optical pulses of a few picosecond long and with a peak power of a few watts have been obtained under dc current injection. Spectral characteristics of the pulses are crucially dependent on the parameters and adjustment of the external cavity