

УДК 621.375.85

ВНЕШНИЙ РЕЗОНАТОР С ЦИЛИНДРИЧЕСКОЙ ЛИНЗОЙ ДЛЯ ПОЛОСКОВЫХ АСТИГМАТИЧНЫХ ЛАЗЕРНЫХ ДИОДОВ

А. К. Чернышов, Г. Н. Чернышова

В работе экспериментально показано, что при длине внешнего резонатора, обеспечивающей наибольший ввод излучения в полосковый AlGaAs лазерный диод, наблюдается одночастотная генерация вблизи порогового тока. Обнаружено, что введение в короткий резонатор цилиндрической линзы компенсирует снижение эффективности согласования, но одночастотная генерация около порога при этом отсутствует. Однако при накачке током $1,5 - 2 I_{th}$ лазерный диод с внешним резонатором, содержащим цилиндрическую линзу, переходит в режим "автостабилизации" одночастотной генерации.

Лазерные диоды (ЛД) благодаря своей миниатюрности и малой энергоемкости являются привлекательными источниками когерентного излучения для интерферометрических измерений и атомной спектроскопии. К сожалению, использование лазерного диода с резонатором, образованным его сколотыми гранями, затруднено, поскольку эти приборы склонны к генерации на нескольких продольных модах со спектральной шириной отдельной моды ~ 100 МГц. Применение оптической обратной связи (ООС) от внешнего резонатора (ВР) для улучшения спектральных характеристик ЛД хорошо известно [1]. Однако при некоторых условиях ООС наоборот ухудшает параметры ЛД, приводя к увеличению амплитудных шумов, самопульсациям, многомодовой генерации. Для устранения этих явлений необходим высокий уровень ООС между лазерным диодом и внешним резонатором [2] и, как правило, высокая селективность последнего.

Сильная оптическая обратная связь означает, что эффективный коэффициент отражения от внешнего резонатора больше или сравним с отражением от грани ЛД,

обращенной к ВР. Это достигается просветлением грани лазерного диода, использованием светосильной оптики и высокоэффективных внешних отражателей (решеток или зеркал). Эффективность ООС определяется также фактором ввода (согласования) излучения из пассивной внешней части обратно в активную область ЛД. В [3] установлено, что из-за астигматизма полосковых лазерных диодов (ширина полоска 5 – 20 мкм) фактор ввода зависел от длины ВР и при оптимальной длине резонатора, соответствующей максимальному фактору ввода, генерация происходила на одной собственной продольной моде ЛД. Ряд работ, посвященных влиянию условий согласования на практически наиболее важный режим генерации ЛД с единственной продольной модой внешнего резонатора (одночастотный режим), уже был сделан [4], но существует ограниченное число публикаций, относящихся к лазерам с узким полосковым контактом [5].

В работе экспериментально показано, что при оптимальной длине внешнего резонатора у полоскового *AlGaAs* лазерного диода наблюдается одночастотная генерация вблизи порогового тока. Обнаружено, что для более коротких ВР введение в резонатор цилиндрической линзы компенсирует снижение эффективности согласования, но одночастотная генерация около порога при этом отсутствует. Однако при накачке, превышающей в 1,5 – 2 раза пороговое значение ЛД с внешним резонатором, содержащим цилиндрическую линзу, происходит переход в режим "автостабилизации" одночастотной генерации.

Отметим, что несмотря на прогресс, достигнутый в изготовлении ИК лазерных диодов со встроенным в боковом направлении волноводом (index-guiding), по-прежнему распространены обсуждаемые здесь ЛД с простейшей структурой без бокового ограничения поля и узким полосковым контактом (gain-guiding) [2]. Кроме того, подобной простой структурой обычно обладают приборы, излучающие в красной и сине-зеленой областях видимого спектра, где изготовление сложных структур еще плохо освоено [6].

Измерения выполнены на промышленных структурах типа ИЛПН-108 и ЛДН-14. Они представляют собой полосковые gain-guided *AlGaAs/GaAs* лазеры с шириной полоскового контакта ~ 10 мкм и длиной резонатора 250 – 280 мкм. Передняя грань лазеров была просветлена до 2 – 4%, а на заднюю грань напылено высокоотражающее покрытие. Приборы имели астигматическое расстояние 30 – 40 мкм, измеренное по методике [7]. Лазеры работали с удаленным защитным стеклом в непрерывном режиме при стабилизации температуры радиатора. Схема экспериментальной установки показана на рис. 1. Излучение лазера (*LD*) от передней грани коллимировалось в параллельный пучок объективом (L_1). В качестве внешнего отражателя (M_1) использо-

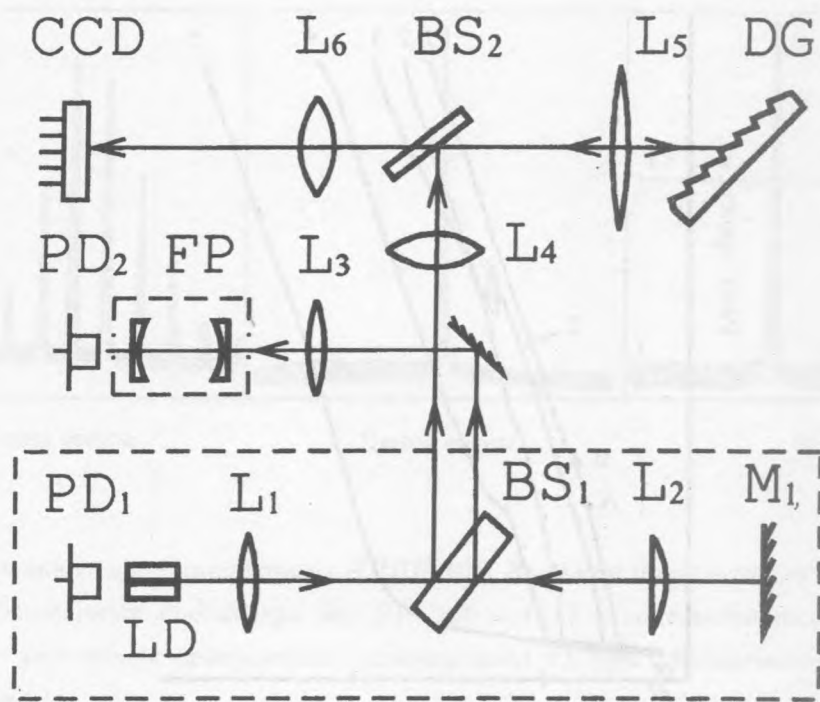


Рис. 1. Схема экспериментальной установки: LD – лазерный диод; L_1 – коллимирующий микрообъектив ($F=6$ мм; $NA=0,4$); L_2 – согласующая цилиндрическая линза ($F=5$ см); M_1 – внешний отражатель; L_3 – L_6 – сферические линзы; FP – сканируемый конфокальный интерферометр Фабри-Перо ($FSR=1,5$ ГГц; $F=25$); DG – дифракционная решетка; BS – расщепитель пучка; PD – фотодиод; CCD – линейка фотодиодов.

валось плоское диэлектрическое зеркало ($R = 99\%$) или дифракционная решетка (1200 штр/мм с максимумом отражения на 800 нм). Стеклопластинка (BS_1) выводила часть излучения из резонатора для контроля. Обзорное наблюдение спектра собственных мод ЛД выполнялось с помощью дифракционной решетки (DG) (600 штр/мм) во втором порядке и линейки ПЗС фотоприемников (CCD). Спектр мод внешнего резонатора контролировался сканирующим конфокальным интерферометром (FP). Мощность излучения измерялась фотоприемником (PD_1), встроенным в сборку лазерного диода.

Первоначально измерены ватт-амперные характеристики для различных длин ВР с плоским зеркалом в качестве внешнего отражателя. Результаты для лазера ИЛПН-108 показаны на рис. 2, минимальный пороговый ток $I_{th} = 73$ мА получен при длине ВР 42 см. Для сравнения на рисунке приведены характеристики для ВР длиной 15 и 80 см,

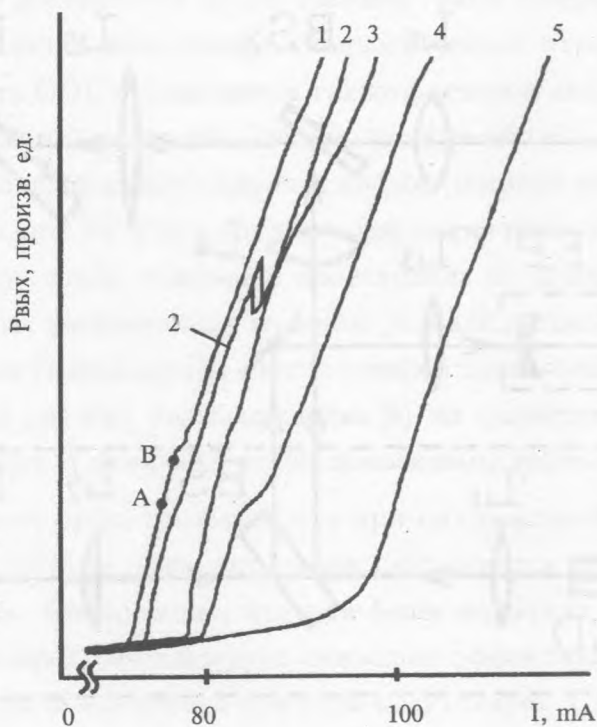


Рис. 2. Ватт-амперные характеристики ИЛПН-108 для различных длин ВР. Внешний отражатель - плоское зеркало: 1 - 42 см ВР ($I_{th} = 73$ мА); 2 - 15 см ВР+ЦЛ ($I_{th} = 74$ мА); 3 - 15 см ВР ($I_{th} = 79$ мА); 4 - 80 см ВР ($I_{th} = 80$ мА); 5 - без ВР ($I_{th} = 97$ мА).

пороговые токи в этих случаях составили 79 и 80 мА, соответственно. Таким образом, для данного образца внешний резонатор длиной 42 см обеспечивал наибольший фактор ввода, что совпадает с оценками, выполненными с помощью [3].

На рис. 3а показан спектр собственных продольных мод рассмотренного выше лазерного диода без ВР. Этот лазер с 42 см внешним резонатором от порога до точки В на кривой 1 (рис. 2) генерировал на одной собственной продольной моде (рис. 3б), за точкой В генерация была многомодовой. Между точками А и В на кривой 1 (рис. 2) прибор работал на единственной продольной моде ВР, о чем свидетельствуют резонансы пропускания конфокального интерферометра на рис. 3с. Подобные результаты получены на нескольких образцах. К сожалению, генерация таких ЛДВР была неустойчивой и наблюдались переключения по внешнерезонаторным и собственным модам лазера. Поскольку одной из причин подобного поведения является высокая чувствительность длинного резонатора к акустическим шумам, то в дальнейшем его длина ограничива-

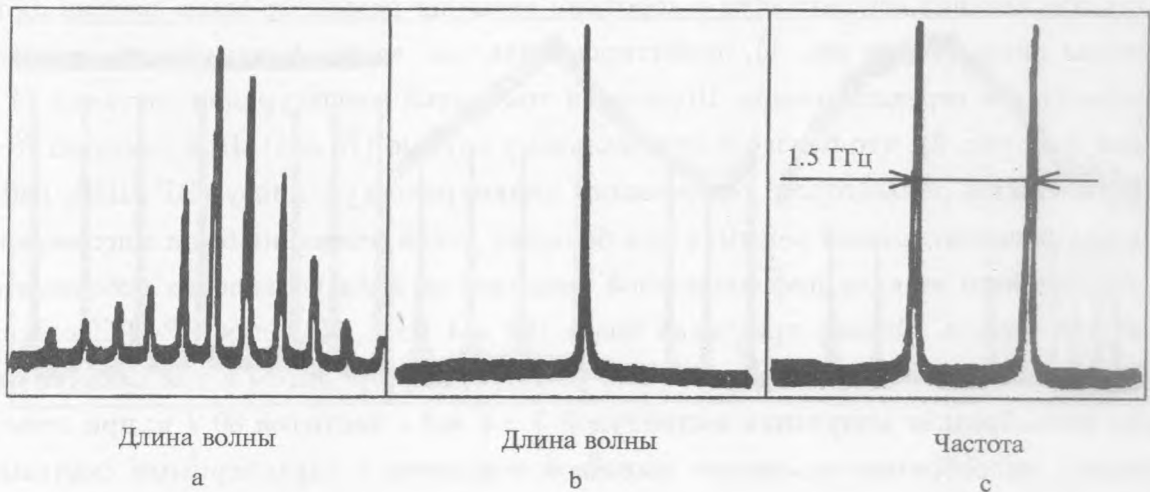


Рис. 3. Спектральные характеристики ИЛПН-108. Внешний отражатель – плоское зеркало: а – спектр собственных мод лазера без ВР (120 мА); б – одномодовый спектр ЛД (42 см ВР, 75 мА); в – резонансы пропускания сканируемого ФР при одночастотной генерации ЛД (42 см ВР, 75 мА).

лась 15 см.

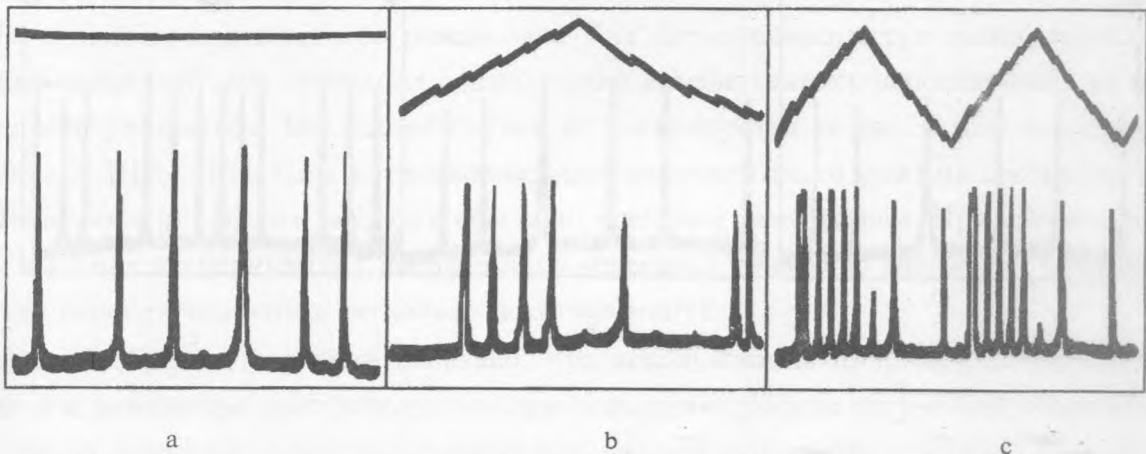


Рис. 4. Перестроечные характеристики ИЛПН-108 с ВР+ЦЛ. Внешний отражатель – дифракционная решетка. На осциллограммах верхняя кривая – выходная оптическая мощность ЛД, нижняя кривая – пропускание сканируемого интерферометра ФР. Одночастотный режим (107 мА): а – модуляция тока ЛД выключена; б – модуляция включена; в – увеличенная скорость развертки.

Для обеспечения согласования в короткий внешний резонатор была введена цилиндрическая линза (L_2 на рис. 1), ориентированная так, чтобы фокусировать излучение в плоскости p - n перехода лазера. Пороговый ток в этой конфигурации составил 74 мА (кривая 2 на рис. 2), что близко к оптимальному случаю (73 мА). При токах до 78 мА у ЛД с внешним резонатором, содержащим цилиндрическую линзу (ВР+ЦЛ), наблюдался квазиодночастотный режим, а для больших токов генерация была многомодовой. Замена внешнего зеркала дифракционной решеткой не дала подавления побочных мод ВР вблизи порога. Однако при токах более 100 мА ($\approx 1,5I_{th}$) для ВР+ЦЛ с решеткой был получен хороший одночастотный режим (рис. 4а). Затем в ток накачки была подана пилообразная модуляция амплитудой $3 - 4 \text{ мА}$ с частотой 80 Гц ; при этом наблюдалось пилообразное изменение выходной мощности с характерными скачками и сгущение резонансов интерферометра (рис. 4б). Последнее связано с переключением частоты генерации по модам ВР при изменении тока ЛД и синхронном сканировании длины интерферометра. Скачки в оптической мощности, которые сопровождали переключения по модам ВР, имели гистерезисный характер, т.е. после изменения направления сканирования тока появлялись участки без переключений (рис. 4б, с).

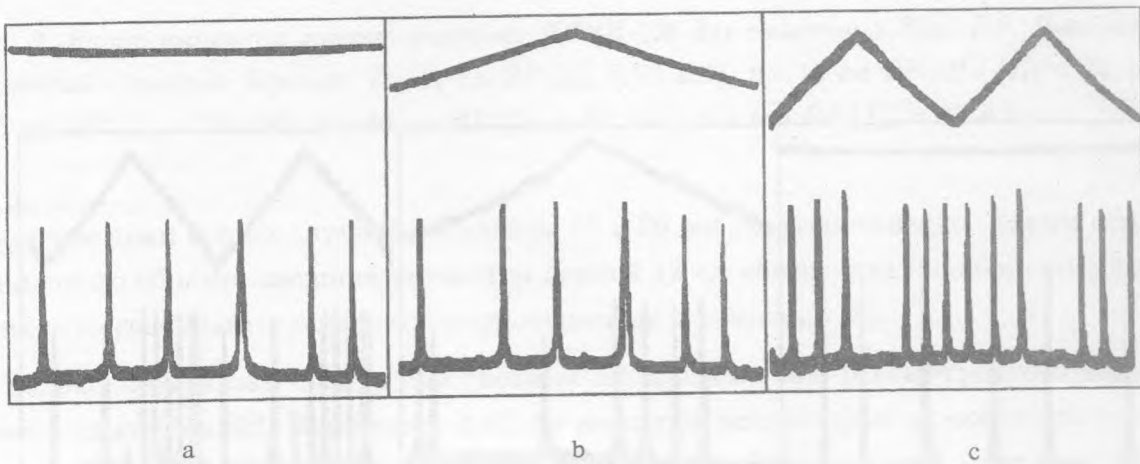


Рис. 5. То же, что и на рис. 4, но в режиме автостабилизации (115 мА): а – модуляция тока ЛД выключена; б – модуляция включена; с – с увеличенной скоростью развёртки.

Подбором положения цилиндрической линзы и величины постоянного тока ЛД можно было добиться того, что участки без переключений оптической мощности расширились на всю амплитуду пилообразной составляющей накачки (рис. 5). В этом случае

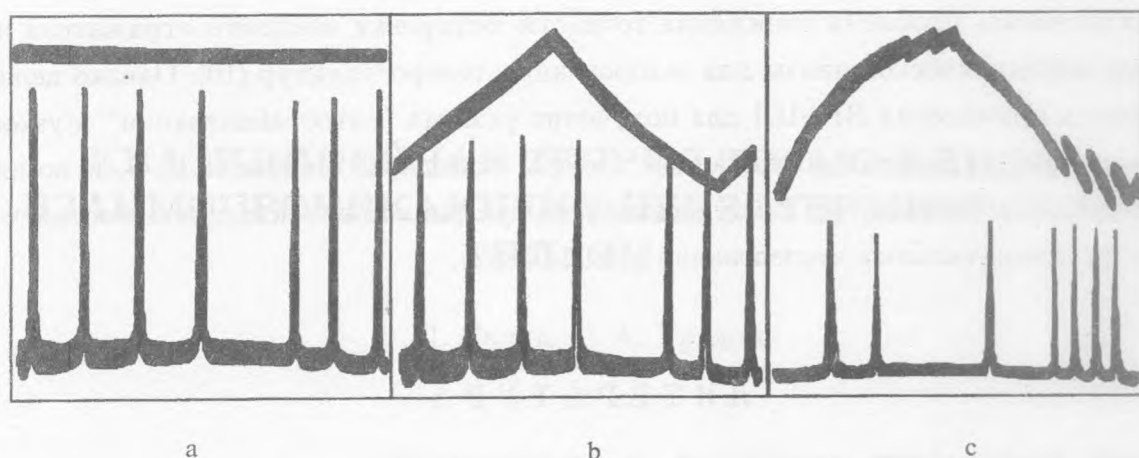


Рис. 6. Перестроечные характеристики ЛДН-14 с ВР+ЦЛ в режиме автостабилизации одночастотной генерации. Внешний отражатель – дифракционная решетка: а – модуляция тока ЛД выключена; б – модуляция включена; с – увеличенная амплитуда модуляции.

резонансы сканируемого интерферометра не меняли частоты следования после включения модуляции тока лазера, хотя амплитуды переменных составляющих накачки на рис. 4 и 5 были одинаковы. Это означает, что усиливалась привязка частоты генерации ЛД к одной из мод внешнего резонатора. Для больших амплитуд сканирования тока режим одночастотной генерации срывался или возобновлялись переключения по модам внешнего резонатора. Последний случай иллюстрируется на рис. 6, где использованы лазеры ЛДН-14. Подобная автостабилизация одночастотного режима генерации ранее сообщалась в [8], но для лазеров с обычным внешним резонатором. При автостабилизации в наших экспериментах наблюдались перескоки только по модам ВР с временами между переключениями в несколько десятков минут.

Таким образом, в работе показано, что использование цилиндрической линзы во внешнем резонаторе дает дополнительное повышение уровня оптической обратной связи. Метод особенно эффективен при использовании gain-guided структур с короткими ВР (≤ 15 см). Увеличить фактор ввода можно и без цилиндрической линзы подбором длины ВР. Однако для типичных значений астигматического расстояния и параметров коллимирующего объектива оптимальная длина резонатора будет от 40 до 100 см, что неудобно.

Конфигурация ВР+ЦЛ уже описывалась в связи с подавлением боковых мод высо-

кого порядка в лазерных диодах с широким контактом и лазерных решетках [9]. Также рассматривалась проблема понижения точности юстировки внешнего отражателя при помощи цилиндрической линзы для захороненных гетероструктур [10]. Однако целесообразность применения ВР+ЦЛ для получения режима "автостабилизации" в узкополосковых лазерах ранее не обсуждалась. Авторы благодарят Якуткина В. В. за помощь в проведении экспериментов. Работа выполнена при финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (95-02-05882).

Л И Т Е Р А Т У Р А

- [1] Wieman C. E., Hollberg L. Rev. Sci. Instrum., **62**, 1 (1991).
- [2] Asakura H., Nagiawara K. et al. Appl. Opt., **32**, 2031 (1993).
- [3] Величанский В. Л., Чернышов А. К. Квантовая электроника, **23**, 233 (1996).
- [4] Sharfin W. F. et al. IEEE J. Quantum Electron., **26**, 1756 (1990).
- [5] Величанский В. Л. и др. Квантовая электроника, **17**, 781 (1990).
- [6] Nurmiikko A. V. et al. IEEE J. Quantum Electron., **30**, 619 (1994).
- [7] Величанский В. Л. и др. Препринт ФИАН N 198, М., 1991.
- [8] Акульшин А. М. и др. Квантовая электроника, **13**, 1391 (1986).
- [9] Snipes M. B., McInerney J. G. SPIE, **1634**, 542 (1992).
- [10] Zorabedian P., Trutna W. R. Opt. Lett., **15**, 483 (1990).

Самарский филиал ФИАН

Поступила в редакцию 13 марта 1997 г.