

ПЕРЕСТРАИВАЕМЫЕ ОДНОЧАСТОТНЫЕ ЛАЗЕРЫ С БРЭГГОВСКИМИ РЕШЕТКАМИ

Представлены результаты работ по созданию одночастотных дискретно перестраиваемых по длине волны в диапазоне 1064–1550 нм полупроводниковых (п/п) лазеров с внешним резонатором на основе волоконных брэгговских решеток, сформированных в одномодовом (ОМ) волоконном световоде. Показано, что при использовании усилительных свойств п/п-лазеров с внешним резонатором, выходным зеркалом которого является суперпозиция нескольких решеток с различными резонансными длинами волн, возможна последовательная или одновременная генерация на этих длинах волн за счет изменения тока инжекции и/или температуры активной области лазерного диода (ЛД).

Отличительная особенность п/п инжекционных лазеров в том, что их спектры усиления и излучения имеют достаточно большую ширину на уровне половинной мощности (FWHM): 30–40 и 2–3 нм, соответственно. Для многих практических применений лазеров важнейшая задача – получение одночастотного режима генерации. К таким применениям относится оптическая связь, спектроскопия высокого разрешения и др. Еще одна важная особенность п/п-лазеров, которая дополнительно расширяет круг их применений, состоит в возможности широкой перестройки длины волны в пределах всего спектрального диапазона усиления.

В работе рассмотрены различные типы перестраиваемых п/п-лазеров. Проведено детальное исследование ЛД с внешним резонатором, образованным внешней дифракционной решеткой, сформированной в ОМ-световоде.

ПРИНЦИПЫ ПЕРЕСТРОЙКИ ДЛИНЫ ВОЛНЫ П/П-ЛАЗЕРОВ

Для перестройки длины волны излучения на первом этапе использовались ЛД с коротким резонатором (100–200 мкм). Учитывая, что межмодовый интервал для таких излучателей велик, разница в усилении соседних мод достигает значительной величины. В результате спектр излучения лазеров с коротким резонатором чаще всего имеет одну продольную моду. Перестройка этих лазеров в пределах 10–20 нм осуществляется изменением температуры и тока накачки. Недостатки таких лазеров: малое значение выходной мощности, большое омическое и тепловое сопротивление – в значительной степени снижают ресурс работы и ведут к нестабильности.

Впоследствии более широкое распространение получили лазеры с распределенной обратной связью (РОС) и распре-

деленным брэгговским отражателем (РБО). Данный класс лазеров имеет более стабильный одночастотный режим работы и достаточно большую оптическую мощность излучения в широком диапазоне температур [1].

Для перестройки длины волны излучения в широком диапазоне чаще всего применяются лазеры с дисперсионным внешним резонатором, в качестве которого используется дифракционная решетка. На рис.1 показана конструкция перестраиваемого ЛД с брэгговской волоконной дифракционной решеткой (ВДР). Основными элементами конструкции являются: лазерный кристалл с отражающим покрытием на задней грани резонатора и просветляющим покрытием на передней грани; брэгговская ВДР, сформированная в ОМ-световоде [2]. Для лучшего согласования лазерного кристалла с волоконным световодом на конце последнего формируется микролинза.

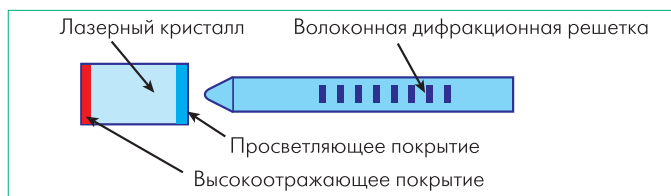


Рис. 1 Принципиальная схема ЛД с брэгговской ВДР

Соотношение, определяющее длину волны генерации такого лазера, представляется в виде: $2\Lambda \cdot n_{\text{eff}} = m\lambda_{\text{в}}$, где Λ – период решетки ВДР; $\lambda_{\text{в}}$ – длина волны лазера; n_{eff} – эффективный показатель преломления; m – порядок волновой моды. В работе [3] была продемонстрирована возможность плавной перестройки длины волны генерации в пределах контура отражения ВДР за счет изменения тока инжекции (0,15–0,2 нм). Другой способ дискретной перестройки длины волны такого лазера – использование (с одним и тем же лазерным кристаллом) различных ВДР с определенными спектрами отражения, лежащими в пределах линии усиления лазера.

В ряде работ [4,5] показано, что, используя специальные решетки с набором линий отражения, можно дискретно перестраивать длину волны генерации лазера в довольно широком спектральном диапазоне (~20 нм). В этих работах внешний резонатор формировался с помощью серии идентичных волоконных брэгговских решеток, имеющих определенный период (рис.2).

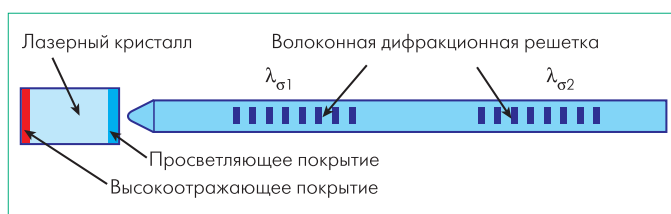


Рис. 2 Принципиальная схема ЛД с двумя последовательно записанными брэгговскими ВДР

Максимально сократить общую длину лазера с дискретной перестройкой длины волны и сделать его компактным позволяет конструкция лазера, в которой используется сочетание селективных свойств брэгговской решетки, сформированной путем последовательной записи нескольких решеток с различным периодом в одном и том же месте волоконного световода (рис.3) [6]. Принцип работы этой конструкции такой же, что и для лазера на рис.2.

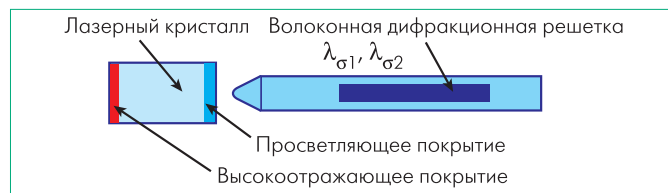


Рис.3 Принципиальная схема ЛД с двумя брэгговскими ВДР, записанными в одном и том же месте волоконного световода

Дискретная перестройка длины волны генерации лазера основана на эффекте Вернье [5]. Область свободной дисперсии интерферометра Фабри-Перо, образованного торцами полупроводникового кристалла, несколько отличается от частотного интервала между максимумами отражения брэгговской решетки. Генерация лазера происходит на длине волны, для которой одна из мод собственного резонатора кристалла совпадает с длиной волны отражения решетки. При изменении тока инжекции и/или температуры лазерного кристалла указанное совпадение происходит на другой длине волны.

ДОСТИГНУТЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ

В работе использовались лазеры на основе гетероструктур InGaAs/GaAs и InGaAsP/InP с квантово-размерными слоями, изготовленными методом МОС-гидридной эпитаксии с пониженным давлением [7]. Для выращивания гетероструктур применялась установка с горизонтальным кварцевым реактором и вращающимся графитовым держателем подложки. Давление в реакторе поддерживалось на уровне $8 \cdot 10^3$ Па. В качестве источника элементов III и V групп использовались Ga (C₂H₅)₃, In (CH₃)₃, AsH₃ и PH₃, подаваемые в потоке водорода. Эпитаксиальный рост проводился на подложках n-GaAs (100) и n-InP. Рабочая длина волны варьировалась в диапазоне 980–1080 и 1250–1650 нм в зависимости от состава активной области. На рис.4 показан типичный состав лазерной гетероструктуры при использовании материалов InGaAsP/InP.

Конструкция активного элемента ЛД типа "зарощенная мезаполоска" показана на рис.5а. В работе использовалась более распространенная сегодня конструкция ЛД с недотравленной активной областью и изоляцией ZnSe, показанная на рис.5б. Для переднего и заднего зеркал лазерного кристалла использовались пропускающие (0,5% отражения)

P-InP-слой
P-InGaAs-слой
P-InP-слой
P-InGaAs-слой
P-InP-слой
P-InAlAs-слой
GRIN-ALQ – твердый раствор, легированный Al
5-6 QW/6-7 барьерных слоев
GRIN-ALQ – твердый раствор, легированный Al
N-InAlAs-слой
N-InP-слой
N-InP-слой

Рис. 4 Типичный дизайн лазерной квантово-размерной гетероструктуры InGaAsP/InP. В зависимости от состава активной области длина волны излучения варьируется от 1250 до 1650 нм

и отражающее (95%) покрытия. Длина лазерного кристалла варьировалась в диапазоне 600–1000 мкм.

Требуемый одночастотный режим и перестройка длины волны обеспечивались с помощью одиночных (дискретных), двойных (последовательно формируемых) и четверных брэгговских ВДР с различным периодом, сформированных на одном участке ОМ-световода. Волоконные брэгговские решетки, использованные в данной работе, формировались излучением второй гармоники аргонового лазера (244 нм) в схеме с интерферометром Ллойда [8]. Длина решеток составляла 5–6 мм.

На рис.6 показано последовательное изменение спектра п/п-лазера в процессе изготовления. Центральная длина волны излучения исследуемого лазера 1648 нм находится в непосредственной близости от линии поглощения метана. В отсутствие напыления спектр излучения состоит из нескольких мод резонатора Фабри-Перо, созданного гранями лазерного кристалла (рис.6а). Напыление покрытий на торцы кристалла резко снижает величину оптической обратной связи, что приводит к соответствующему изменению спектра излучения (рис.6б). Как было отмечено ранее, перестройка

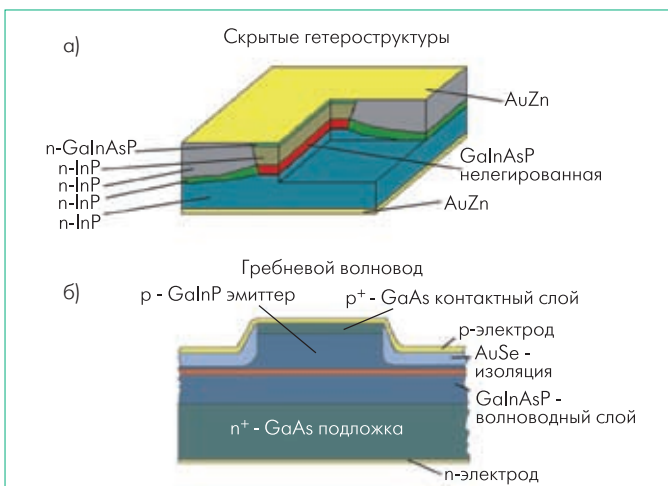


Рис. 5 Конструкция активного элемента ЛД: зарощенная мезаполоска (а) и недотравленная активная область (б)

длины волны возможна в пределах этого спектрального диапазона. На практике одночастотный режим генерации удается получать в пределах длины этого диапазона, отсчитанной на уровне половинной мощности. При стыковке ЛД с одиночной брэгговской ВДР генерация начинается на длине волны отражения ВДР. Типичный спектр одночастотной генерации показан на рис.6в.

На рис.7 показаны ватт-амперные характеристики ЛД с одиночной брэгговской ВДР при различных температурах (5–80°C). Представлены результаты для двух лазеров с длинами волн 1300 и 1650 нм.

При исследовании дискретно перестраиваемого между двумя частотами ЛД использовались две пространственно разнесенные ВДР, имеющие максимумы отражения $\lambda_{\text{б1}}=1063,3$ нм и $\lambda_{\text{б2}}=1064,2$ нм. В конструкции использовался лазерный кристалл длиной 1000 мкм, имеющий максимум усиления на длине волны 1064 нм. Две брэгговские ВДР были сформированы в ОМ-световоде с диаметром сердцевинки 5,6 мкм и диаметром оболочки 125 мкм. Расстояние между решетками составляло ~0,5 м. На торце световода для увеличения коэффициента ввода излучения была сформирована микролинза с диаметром скругления ~10 мкм. Одна из брэгговских решеток располагалась в непосредственной близости от передней просветленной грани ЛД. Обе решетки имели коэффициент отражения порядка 30% и спектральную ширину ~0,35 нм. Переключение длины волны генерации лазера происходило

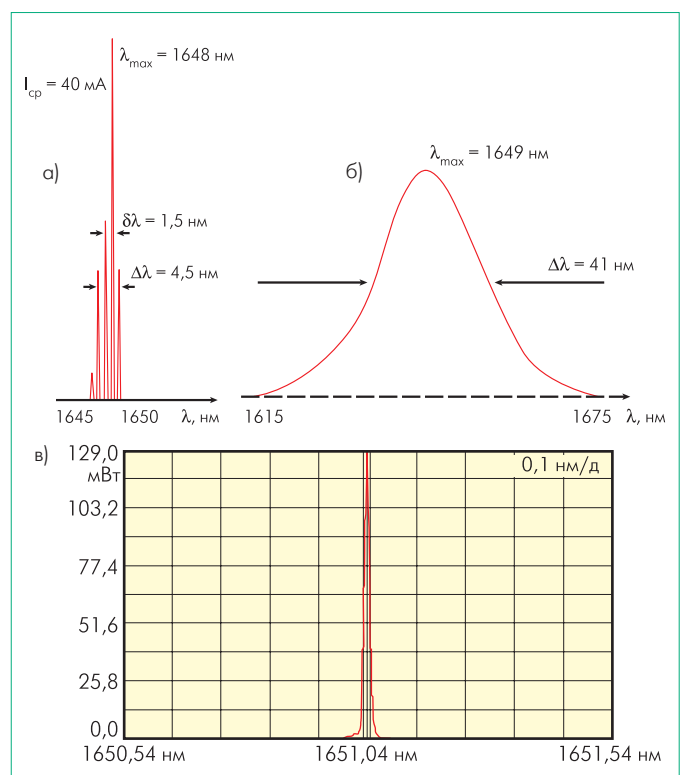


Рис. 6 Спектр излучения одночастотного ЛД с одиночной брэгговской ВДР с длиной волны генерации 1650 нм в процессе производства: а) без покрытий, б) с покрытиями, в) стыкованный с одиночной брэгговской ВДР

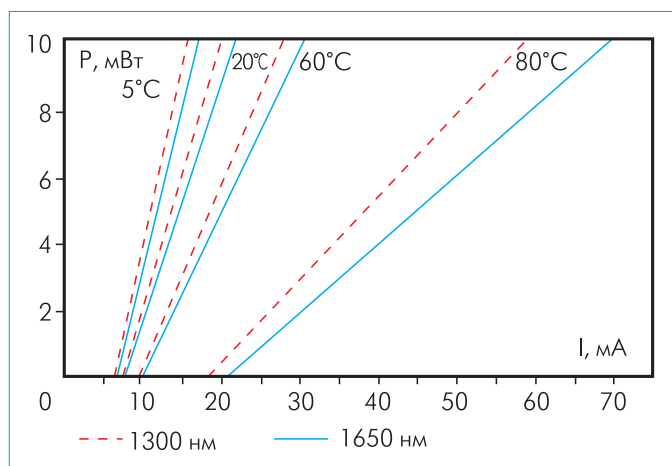


Рис. 7 Ватт-амперные характеристики ЛД с одиночной брэгговской ВДР и длиной волны излучения 1300 и 1650 нм

за счет сдвига максимума усиления лазера при изменении тока инжекции. Генерация лазера происходит на длине волны отражения той решетки, для которой обратная связь при данной температуре и токе становится больше (резонансная длина волны решетки лучше совпадает с линией, генерируемой собственно резонатором лазерного кристалла).

На рис.8 показана токовая перестройка длины волны излучения. Пороговое значение тока инжекции составило $I_{пор} = 64$ мА. Видно, что при температуре кристалла $T = 25^\circ\text{C}$ и токе накачки $I_H = 80$ мА длина волны излучения такого лазера составляет $\lambda = 1063,35$ нм, что хорошо согласуется с длиной волны отражения коротковолновой решетки $\lambda_{б1}$. Мощность излучения на выходе световода с решетками при этом была равна 2 мВт.

При $T = 25^\circ\text{C}$ и $I_H = 100$ мА в спектре излучения присутствуют одновременно две длины волны, соответствующие обеим решеткам, а суммарная мощность излучения на выходе световода составляет 3 мВт. При $T = 25^\circ\text{C}$ и $I_H = 125$ мА длина волны излучения составила 1064,22 нм (длина волны второй решетки $\lambda_{б2}$), а мощность излучения – 5 мВт.

Таким образом, происходит токовое переключение длины волны лазера на $\lambda = 1064$ нм во внешнем резонаторе с двумя брэгговскими решетками в одном волоконном световоде. На обеих длинах волн генерации ширина линии излучения была меньше аппаратной функции использованного нами спектроанализатора 0,08 нм, что подтверждает одночастотность выходного излучения. Подавление боковых мод лазера было на уровне -30 дБ.

При исследовании ЛД с переключением между четырьмя длинами волн использовался волоконный световод с четырьмя брэгговскими ВДР, имеющими различные резонансные длины волн. ВДР были сформированы УФ-излучением путем последовательной экспозиции одного и того же участка волоконного световода. Спектр пропускания такой системы решеток представлен на рис.9. Коэффициент отражения решеток составил ~25%. Спектральная ширина пиков отражения была ~0,3 нм при расстоянии между ними – 0,4 нм. В этом случае также использовался лазерный кристалл длиной 1000 мкм.

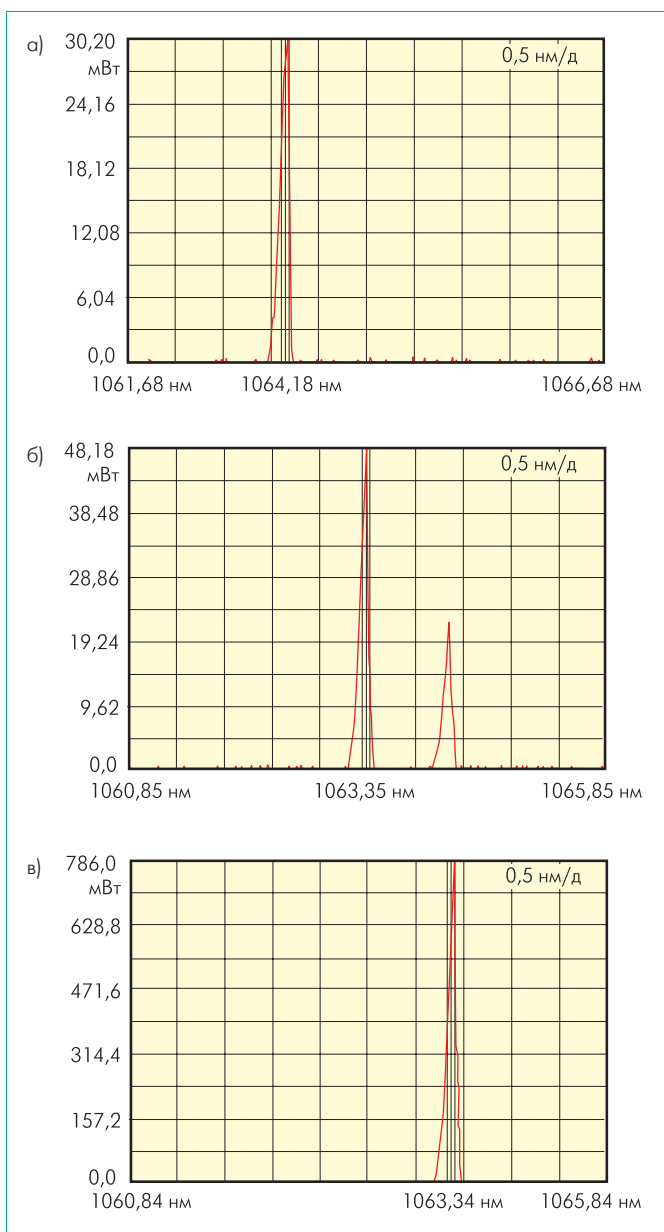


Рис. 8 Токовая перестройка длины волны лазера на $\lambda = 1064$ нм с двумя последовательно записанными брэгговскими ВДР: а) $T = 25^\circ\text{C}$ и $I_H = 80$ мА; б) $T = 25^\circ\text{C}$ и $I_H = 100$ мА; в) $T = 25^\circ\text{C}$ и $I_H = 125$ мА; (масштаб по горизонтали 0,5 нм/д)

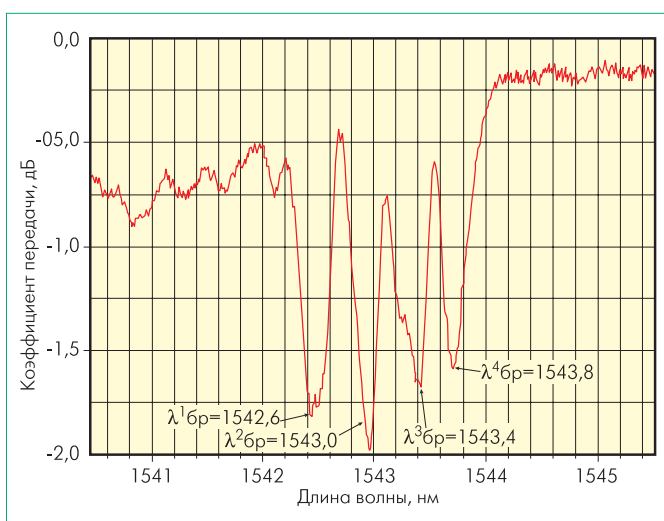


Рис. 9 Спектр пропускания системы четырех брэгговских ВДР

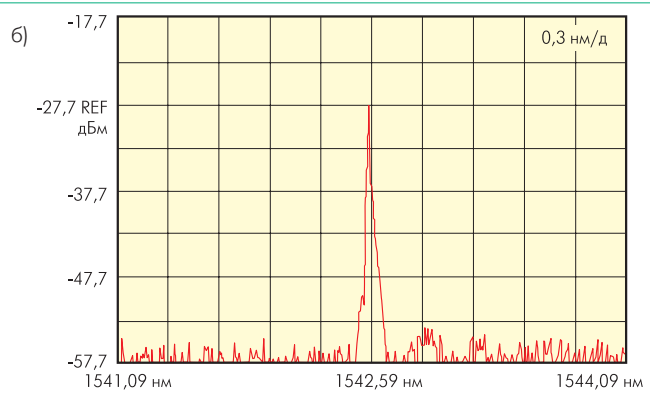
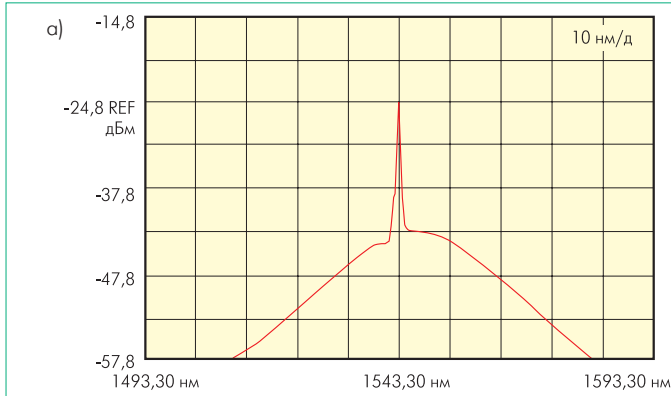


Рис. 10 Токовая перестройка длины волны излучения лазера на $\lambda=1546$ нм с четырьмя брэгговскими ВДР в одном световоде: а) $T=25^\circ\text{C}$ и $I_n=51$ мА; б) $T=25^\circ\text{C}$ и $I_n=73$ мА; в) $T=25^\circ\text{C}$ и $I_n=100$ мА; г) $T=25^\circ\text{C}$ и $I_n=56$ мА; д) $T=25^\circ\text{C}$ и $I_n=153$ мА

Как и в предыдущем случае, световод с записанными решетками был состыкован с лазерным кристаллом с помощью микролинзы, сформированной на конце световода.

На рис.10 показана токовая перестройка длины волны лазера, пороговое значение тока в котором составило $I_{\text{пор}}=54$ мА. Как видно на рис.9 и 10а, все резонансы составной решетки находятся близко к максимуму контура линии усиления лазера. При $T=25^\circ\text{C}$ путем изменения тока накачки ЛД были получены все четыре одночастотные моды гибридного резонатора с уровнем подавления боковых мод не менее 30 дБ:

- $\lambda_{61}=1542,6$ нм при $I_n=73$ мА, $P_{\text{вых}}=1,2$ мВт, (рис.10б);
- $\lambda_{62}=1543,0$ нм при $I_n=100$ мА, $P_{\text{вых}}=3,2$ мВт, (рис.10в);
- $\lambda_{63}=1543,5$ нм при $I_n=56$ мА, $P_{\text{вых}}=0,5$ мВт, (рис.10г);
- $\lambda_{64}=1543,8$ нм при $I_n=153$ мА, $P_{\text{вых}}=6,4$ мВт (рис.10д).

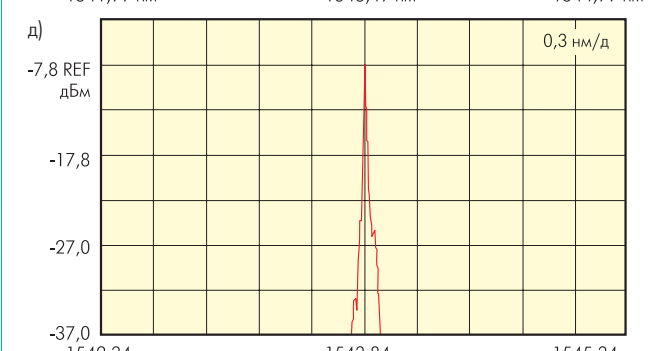
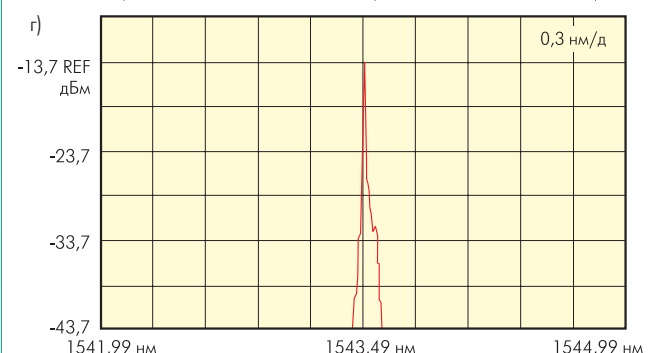
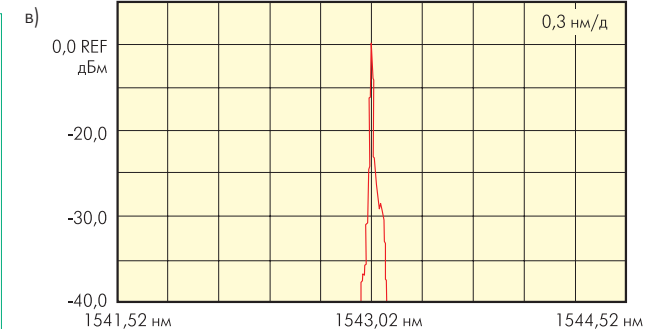
Интересно, что при токе накачки $I_n=175$ мА условия генерации на всех четырех резонансных длинах волн брэгговской решетки были близки, поэтому в спектре выходного излучения присутствовали одновременно все четыре спектральные линии с примерно равной интенсивностью.

Таким образом, продемонстрирована токовая дискретная перестройка длины волны генерации гибридного лазера на $\lambda=1542$ нм с четырьмя решетками, сформированными на одном участке ОМ-световода.

Отметим в заключение, что переключение длины волны генерации лазеров, аналогичное описанному, было достигнуто при постоянном токе накачки и изменении температуры лазерного кристалла.

Конструкция лазерного модуля с брэгговской ВДР состоит из металлокерамического корпуса типа 14-штырькового DIL-корпуса или корпуса типа "бабочка", ЛД, фотодиода обратной связи, элемента Пельтье, терморезистора и световода с брэгговской ВДР. Общий вид конструкции одночастотного лазерного модуля с корпусами двух типов показан на рис.11.

Итак, описан принцип работы, представлены конструкции, проведены исследования и изложены основные характеристики перестраиваемых одночастотных ЛД с одиночными,



двойными и четверными брэгговскими ВДР. Впервые описан режим дискретной перестройки длины волны генерации одночастотных п/п-лазеров с внешними резонаторами, созданными несколькими брэгговскими ВДР, записанными на одном и том же участке ОМ-световода.

ЛИТЕРАТУРА

1. Duraev V.P., A.V.Melnikov. – Spectrochimica Acta. Part A, 52, 1996, p.877-879.
2. Duraev V.P., E.T.Nedelin. – Quantum Electronics, 31, 2001, p.529-530.
3. Дуряев В.П., Е.Т.Неделин, Т.П.Недобывайло, М.А.Сумароков, К.И.Климов. – Квантовая электроника, т.31, №6, 2001, с.529-530.

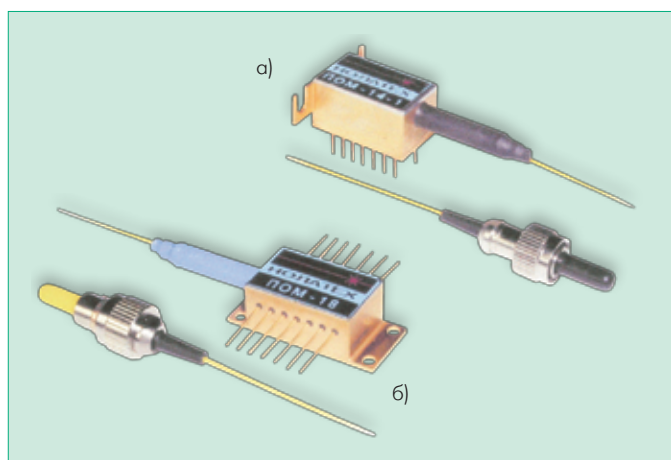


Рис. 11 Волоконный лазерный модуль в корпусе 14-pin DIL (а) и "Butterfly" (б)

4. **Bergonzo A.** et al. 12-channels 200 GHz-spacing digitally tunable external cavity laser with fast wavelength switching. – ECOC_IOOC_2003 Proceedings, vol.4, p.888–889, Rimini, 2003.
5. **Bergonzo A.** et al. Vernier tunable external cavity laser including a sampled fiber Bragg grating with digital wavelength selection. – IEEE Photonics Technology Letters, 15 (8), 2003, p.1144–1146.
6. **Kashyap R.** Fiber Bragg Gratings. – Academic Press, 1999.
7. **Mikhailov V., P.Bayvel, R.Wyatt, I.Lealman.** – Electronics Letters, vol.37, 2001, p.909-910.
8. **Медведков О.И., И.Г.Королев, С.А.Васильев.** Запись волоконных брэгговских решеток в схеме с интерферометром Ллойда и моделирование их спектральных свойств. – Препринт НЦВО ИОФ РАН №6, 2004.

ОПЕЧАТКА В ЖУРНАЛЕ "ФОТОНИКА" №2, 2007

В результате ошибки при конвертировании файла – оригинала статьи "А.Ларюшин, Д.Васильев, Е.Рудь. Выбор параметров оптических систем визуальной навигации" был ошибочно интерпретирован рисунок 5. Ниже он воспроизведен корректно и полностью. Редакция приносит читателям свои извинения.

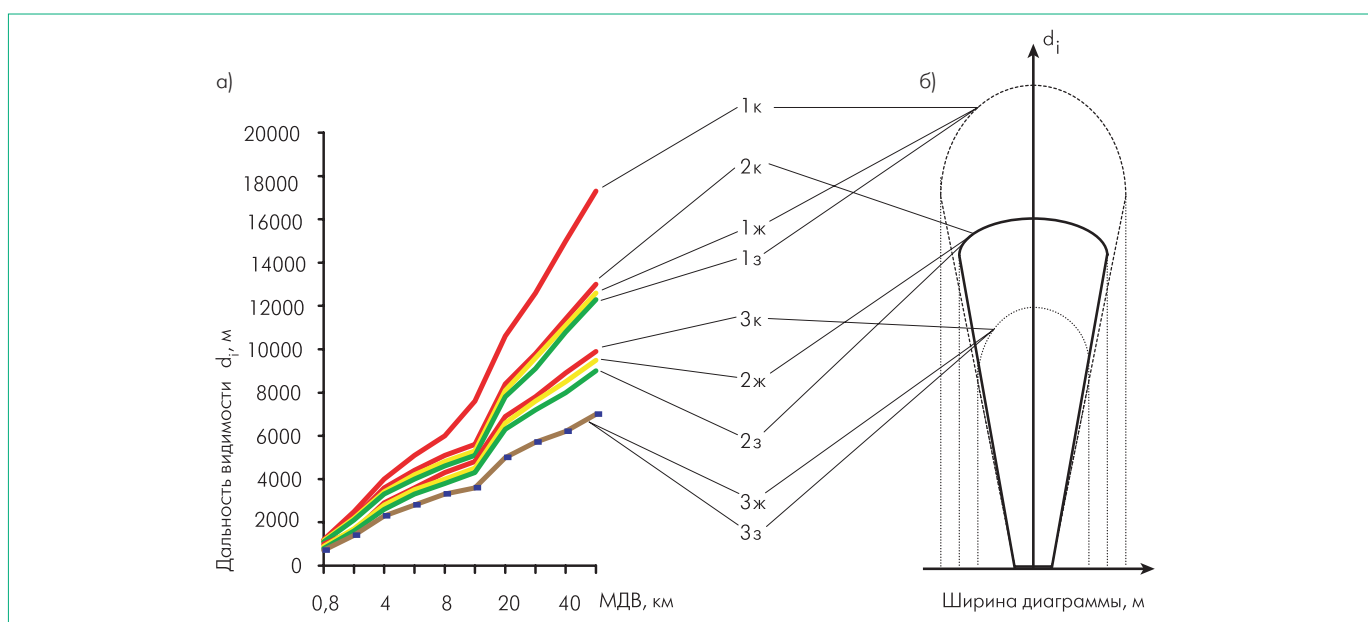


Рис.5 Дальность видимости светового поля (а); характерные контуры диаграммы (б): 1 –одиночная линза ($K_{oc} = 4183,286 \text{ м}^{-3}$), вероятность обнаружения 0,5; 2 – идеальная оптическая система ($K_{oc} = 0$), вероятность обнаружения $p \approx 1$; 3 – одиночная линза, вероятность обнаружения $p \approx 1$; к, ж, з – длины волн 625 нм, 590 нм и 505 нм, соответственно