

## УПРАВЛЕНИЕ ПАРАМЕТРАМИ ЛАЗЕРНОГО ИЗЛУЧЕНИЯ

PACS 42.25.Kb; 42.55.Px; 42.60.Jf; 42.82.Et

**Когерентное сложение излучения линейки однодиодовых лазерных диодов****С.И.Державин, О.А.Дюкель, Н.М.Лындин**

*Продемонстрирована синхронная генерация линейки из 25 однодиодовых лазерных диодов во внешнем резонаторе с использованием волноводного решеточного зеркала, обладающего угловой и спектральной селективностью. Установлено, что генерация лазерной линейки осуществляется на антифазной супермоды со стабилизированной длиной волны 930.8 нм и с выходной мощностью до 0.75 Вт. Качество выходного пучка близко к дифракционному ( $M^2 \approx 1.2$ ) по обоим направлениям.*

**Ключевые слова:** лазерная диодная линейка, когерентное сложение излучения, волноводное решеточное зеркало, антифазная мода генерации линейки лазеров.

Задача когерентного сложения излучения массива лазерных источников привлекает внимание исследователей на протяжении многих лет. Решение этой проблемы позволит создать мощный малогабаритный высокоэффективный источник света высокой яркости. Наиболее распространен способ когерентного сложения лазерных излучателей с помощью внешнего общего резонатора. Подобный метод применялся для фазировки волноводных [1], твердотельных и  $\text{CO}_2$ -лазеров [2], а также лазерных диодов [3, 4]. При использовании внешнего резонатора применялись главным образом такие методы выделения коллективной моды массива лазерных источников, как дифракционная связь набора лазеров, эффект Тальбо и фурье-фильтрация. Во всех этих методах предполагается значительная длина внешнего резонатора. В появившихся в последнее время работах в качестве селективного элемента обратной связи внешнего резонатора линейки лазерных диодов применяется объемное брэгговское зеркало [3, 4]. Исследовались два варианта выделения коллективной моды – с помощью эффекта Тальбо и с использованием угловой селективности объемного брэгговского зеркала. В обоих случаях получено когерентное сложение излучения, однако диаграмма направленности выходного излучения остается многолепестковой. Следует также отметить, что угловая селективность объемного брэгговского зеркала слабо зависит от длины  $l$  взаимодействия излучения с зеркалом:  $\Delta\varphi \approx \sqrt{\lambda/l}$ . Поэтому только выделение одной коллективной моды, обладающей однолепестковой выходной диаграммой направленности, позволит лазерным системам данного типа иметь излучение высокого качества, а значит, и высокой яркости.

В настоящей работе в качестве селективного элемента обратной связи линейки однодиодовых лазерных диодов предлагается использовать волноводное решеточное зер-

кало (ВРЗ), обладающее высокой угловой и спектральной селективностью [5–7]. При этом достигаются две цели: во-первых, длина внешнего резонатора может быть настолько короткой, насколько позволяет оптика, коллимирующая излучение по быстрой оси, и, во-вторых, оптимальная угловая селективность зеркала позволяет реализовать однолепестковую выходную диаграмму направленности излучения.

Ранее ВРЗ уже применялось в качестве внешнего резонатора для диодных лазеров с широким полосковым контактом для стабилизации спектра и повышения яркости излучения [8, 9].

В наших экспериментах использовалась линейка из 25 однодиодовых лазерных диодов (НИИ «Полус», Москва), излучающих на длине волны 930 нм. Ширина каждого лазерного диода составляла 4 мкм при периоде их расположения  $p = 8$  мкм. Длина полупроводникового кристалла была 1 мм. Кристалл накачивался через решетку электродов (ширина 4 мкм, период 8 мкм), при этом формировалась структура однодиодовых лазеров с боковым ограничением за счет усиления. Задняя грань кристалла имела высокое отражение ( $R > 95\%$ ) на рабочей длине волны генерации. Передняя грань просветлялась ( $R < 0.5\%$ ), чтобы предотвратить возникновение генерации на гранях самого полупроводникового кристалла.

Экспериментальная установка показана на рис.1. Излучение лазерной диодной линейки коллимировалось по быстрой оси (перпендикулярной плоскости p–n-перехода) асферической цилиндрической линзой (ЛИМО, Германия) с большой числовой апертурой ( $NA = 0.8$ ) и фокусным расстоянием 0.29 мм. Для установки линзы был специально разработан высокостабильный столик, позволявший юстировать ее по трем линейным и трем угловым координатам ( $X, Y, Z; \alpha, \theta, \varphi$ ). Внешнее ВРЗ юстировалось по пяти координатам ( $X, Y, Z; \alpha, \theta$ ), при этом ось  $Z$  направлена вдоль оси резонатора. Для исключения паразитного отражения от задней грани подложки ВРЗ использовался оптический клин с углом при вершине  $3^\circ$ , который с помощью водоглицериновой смеси фиксировался на подложке.

**С.И.Державин, О.А.Дюкель, Н.М.Лындин.** Институт общей физики им. А.М.Прохорова РАН, Россия, 119991 Москва, ул. Вавилова, 38; e-mail: derzh@kapella.gpi.ru

Поступила в редакцию 8 февраля 2012 г., после доработки – 27 марта 2012 г.

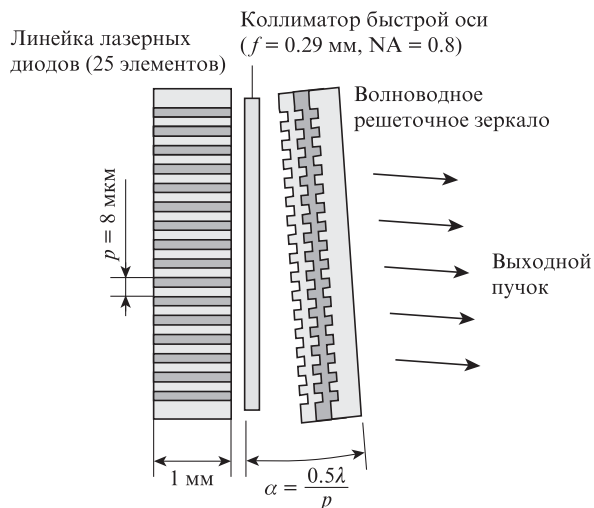


Рис.1. Схема фазировки линейки лазерных диодов во внешнем резонаторе с ВРЗ.

В общем случае  $N$  одномодовых связанных лазеров поддерживают  $N$  (в нашем случае 25) независимых типов колебаний (мод). На рис.2,*a* в качестве примера приведены распределения вдоль  $p$ - $n$ -перехода полей 0-й, 23-й и 24-й мод линейки лазерных диодов. Распределение полей мод в плоскости  $p$ - $n$ -перехода рассчитывалось известным в интегральной оптике методом эффективного показателя преломления в многослойной структуре со слабым контрастом показателя преломления. Для получения когерентного выходного излучения необходимо выделить одну моду. Наиболее подходящей для селекции является мода наивысшего порядка (24-я мода), или антифазная мода. В этой моде соседние лазеры имеют сдвиг фазы поля, равный  $\pi$ .

На рис.2,*b* показаны угловые распределения полей 0-й, 23-й и 24-й мод линейки лазерных диодов в дальней зоне. Следует отметить, что распределение излучения антифазной моды имеет два основных пика, расположенных под углами  $\pm\lambda/2p$  по отношению к нормали к выходной грани линейки. Один из этих пиков с эффективностью, близкой к 100%, отражается ВРЗ обратно в резонатор, а второй пик формирует выходное излучение, поскольку для него ВРЗ прозрачно. Профиль пучка излучения в каждом пике имеет распределение, пропорциональное  $\sin^2$ , поэтому теоретическое значение параметра качества выходного пучка  $M^2$  лежит в диапазоне 1.1–1.2.

Угловые и спектральные селектирующие свойства ВРЗ при нормальном падении света на него связаны с одновременным возбуждением волноводных мод, распространяющихся в планарном гофрированном волноводе в противоположных направлениях. Для диэлектрических структур без потерь максимальный коэффициент отражения такого зеркала всегда равен единице. Ширина углового распределения отражения ВРЗ примерно обратно пропорциональна расстоянию распространения  $L$  этих мод по волноводу ( $\Delta\varphi \approx \lambda/L$ ) или пропорциональна квадрату глубины гофра [5]. Это обстоятельство позволяет легко выбирать необходимую угловую селективность зеркала. Расстояние распространения волноводных мод  $L$ , а значит, и угловое распределение отражения ответственны за возможность выделения одной коллективной моды.

Волноводное решеточное зеркало рассчитано с помощью программного обеспечения, моделирующего диф-

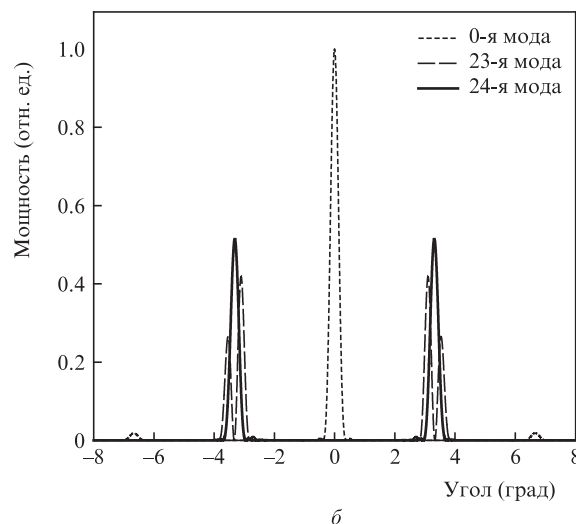
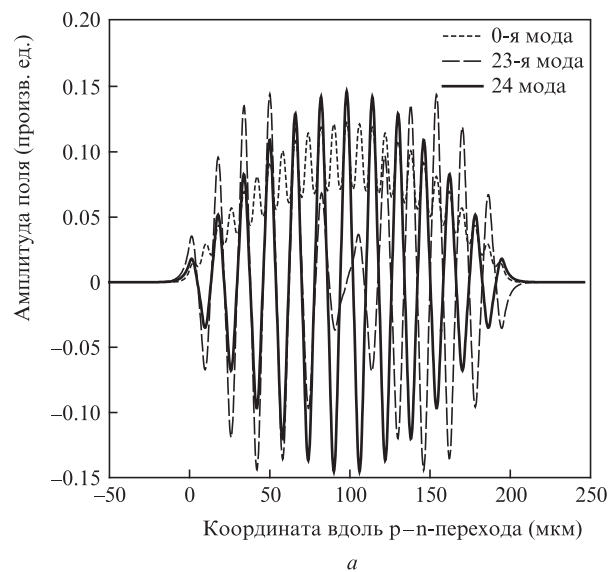


Рис.2. Распределение амплитуды поля в линейке лазерных диодов в плоскости, параллельной  $p$ - $n$ -переходу, вдоль выходной апертуры (*a*) и угловое распределение мощности в дальней зоне в плоскости, параллельной  $p$ - $n$ -переходу (*b*).

ракционные процессы в периодических структурах [10]. Волновод в ВРЗ\* сформирован двумя слоями:  $\text{Ta}_2\text{O}_5$  (толщина 178.2 нм,  $n = 2.193$ ) и  $\text{SiO}_2$  (толщина 102.9 нм,  $n = 1.483$ ), напыленными на гофрированную (волнообразную) поверхность подложки, изготовленной из кварца высокого оптического качества ( $n = 1.451$ ). Эти слои образуют также антиотражающее покрытие для излучения вне резонанса. Период гофра и его глубина составляют 580 и 39 нм соответственно.

На рис.3,*a* приведено угловое распределение отражения ВРЗ, а также угловое распределение падающего на зеркало излучения 24-й и 23-й мод линейки лазерных диодов. Следует отметить, что эффективность отражения 23-й моды значительно меньше, чем эффективность отражения 24-й. Отражение остальных мод еще слабее. Таким образом, ВРЗ обеспечивает простой путь селекции единственной общей моды без увеличения длины внешнего

\* Образцы ВРЗ были изготовлены в Лаборатории Юбер Кюрьен, Университет Жан Моне, Сент-Этьен, Франция (Laboratoire Hubert Curien, Université Jean Monnet, Saint-Etienne, France).

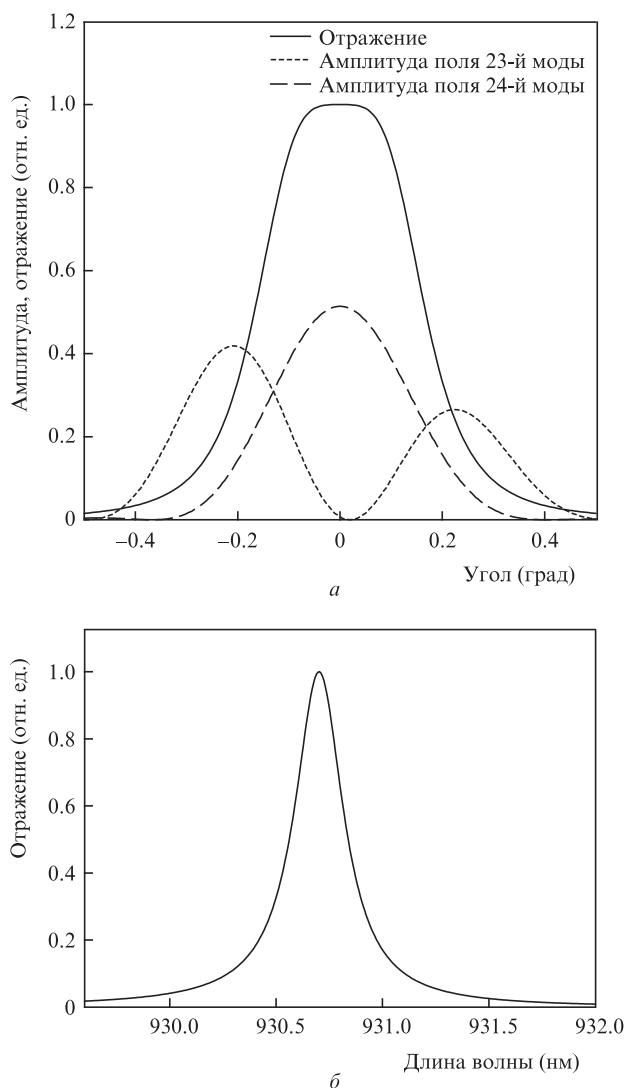


Рис.3. Угловая зависимость эффективности отражения плоской волны от ВРЗ при длине волны 930.7 нм (а) и спектральная зависимость отражения излучения при нормальном падении (б).

резонатора (в противоположность альтернативным методам селекции). С применением ВРЗ длина внешнего резонатора может быть сделана настолько малой, насколько это позволят технические условия. Спектральная селективность используемого ВРЗ показана на рис.3,б.

В работе использовалась наиболее перспективная схема получения генерации с выделением одной антифазной моды, предусматривающая полное отражение одного пика излучения обратно в резонатор (что соответствует эффективной обратной связи до 25%) и вывод рабочего излучения через второй пик.

Без ВРЗ генерация линейки лазерных диодов отсутствовала во всем диапазоне токов накачки, при наличии ВРЗ порог генерации составил 0.45 А. Максимальная мощность 750 мВт в одном пике выходного излучения в непрерывном режиме получена при токе накачки 3.5 А. Мощность во втором подавленном пике антифазной моды была значительно меньше, чем в основном. Дифференциальная эффективность генерации диодной линейки во внешнем резонаторе с выделением одной антифазной супермоды составила 0.25 Вт/А (рис.4). Для сравнения на этом же рисунке представлена дифференциальная эффективность для диодной линейки той же длины, но с резонатором на соб-

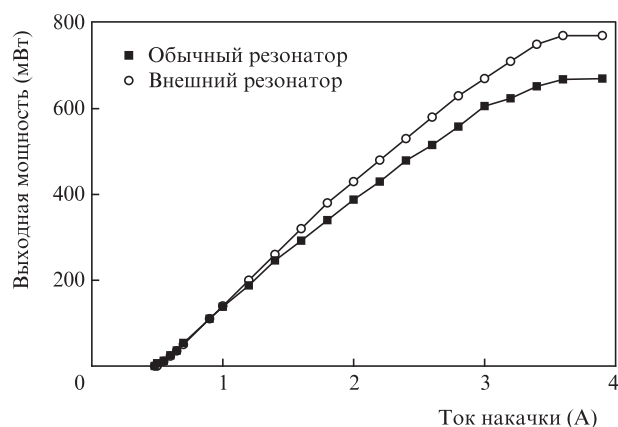


Рис.4. Выходная мощность излучения диодной линейки в зависимости от тока накачки для двух вариантов резонатора.

ственных гранях полупроводникового кристалла, имеющих коэффициенты отражения 100% и 10%. Большую эффективность для конфигурации с внешним зеркалом мы объясняем оптимальной величиной обратной связи. Насыщение выходной энергии в обоих случаях связано с неидеальным теплоотводом от полупроводникового кристалла.

Угловое распределение излучения в дальней зоне для двух одинаковых диодных линеек, имеющих либо обычный резонатор (зеркала на гранях полупроводникового кристалла), либо внешний резонатор, образованный ВРЗ, представлено на рис.5. Как видно из рисунка, диодная система с внешним резонатором и ВРЗ генерирует одну антифазную моду. Интенсивности излучения в этих двух случаях сильно различаются; для сравнения угловых распределений мощности излучения графики нормированы на максимальную величину. В обоих случаях ток накачки составлял 1 А.

В линейке с обычным резонатором выходная мощность распределена в широком (вплоть до 30°) угловом диапазоне, тогда как в линейке с внешним резонатором и ВРЗ выходная мощность сосредоточена в основном в единичном узком пике -0.5 дифракционного порядка (для антифазной решетки разность фаз между соседними элементами решетки вдоль направления дифракционных порядков должна составлять нечетное число  $0.5\lambda$ ). Также отчетливо виден второй пик +0.5 дифракционного порядка, который сильно, но не полностью, подавлен резонанс-

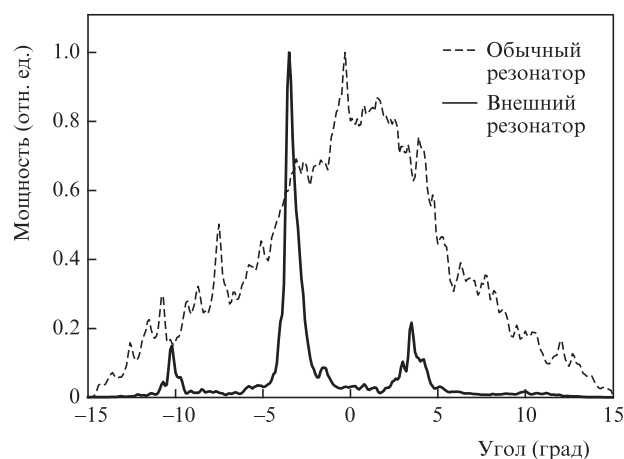


Рис.5. Распределение мощности излучения диодной линейки в дальнем поле для двух вариантов резонатора.

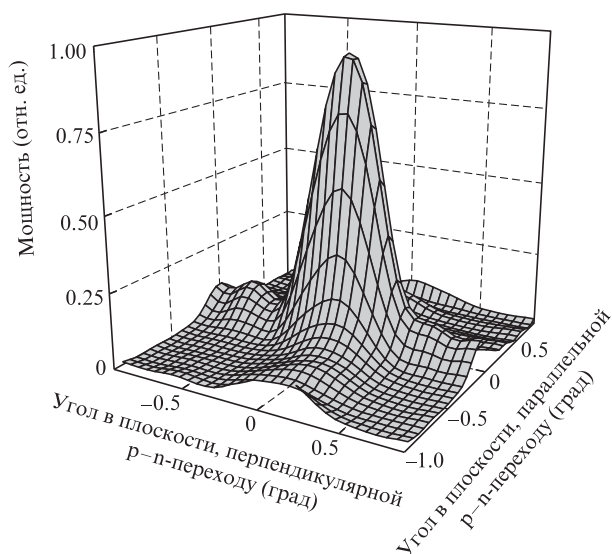


Рис.6. Двумерное распределение мощности излучения диодной линейки с внешним резонатором в дальнем поле.

ным зеркалом, что объясняется сравнимыми величинами угловых ширин ВРЗ и главных пиков. Более сильное подавление этого пика ожидается в лазерных линейках с большим числом одиночных диодов.

Мощность в дифракционных пиках +1.5 порядка, для которых ВРЗ прозрачно, относительно мала, причем отношение выходной мощности в этих пиках к мощности основного пика уменьшается с увеличением тока накачки.

Качество выходного пучка и мощность главного пика слабо зависят от длины внешнего резонатора при ее изменении от минимальных значений до нескольких сантиметров. Диаграмма выходного пучка в дальней зоне при токе накачки 3.5 А представлена на рис.6. В дополнение к главному пику в обоих направлениях наблюдаются слабые пики-спутники. Появление пиков в направлении, перпендикулярном плоскости  $p-n$ -перехода, обусловлено абберацией коллимирующей линзы. Наличие малых пиков в направлении вдоль  $p-n$ -перехода – естественное следствие дифракции излучения конечного числа когерентных лазерных диодов. Значение  $M^2$  главного пика близко к 1.2 в обоих направлениях; для направления в плоскости  $p-n$ -перехода оно очень близко к теоретическому значению  $M^2$  одного пика излучения антифазной моды лазерного массива (1.1–1.2).

Спектры излучения линейки лазерных диодов в случае внешнего и обычного резонаторов представлены на рис.7. Измерения были выполнены с помощью монохроматора с разрешением 0.1 нм и CCD-камеры. Спектральное распределение излучения линейки с обычным резонатором сильно зависит от тока накачки и температуры кристалла, в то время как спектр линейки с резонансным зеркалом имеет одну узкую линию с фиксированной длиной волны во всем диапазоне токов накачки и температур системы охлаждения. Длина волны излучения и ширина спектра определяются параметрами ВРЗ.

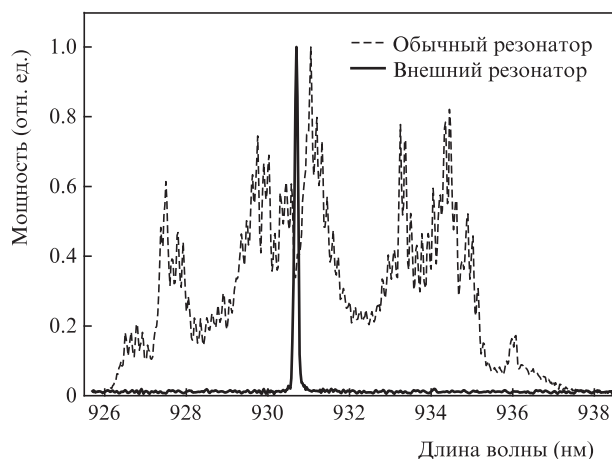


Рис.7. Спектры излучения диодной линейки для двух вариантов резонатора.

Таким образом, продемонстрирована коллективная генерация линейки одномодовых лазерных диодов во внешнем резонаторе с выходным волноводным резонансным зеркалом. Вследствие высокой угловой селективности ВРЗ получена генерация на одной коллективной (в нашем случае антифазной) моде. Качество выходного излучения близко к дифракционному. Физические свойства ВРЗ позволяют использовать предельно короткий внешний резонатор (с потенциальной возможностью размещения коллимирующей линзы и ВРЗ непосредственно на полупроводниковом кристалле). Получена выходная мощность 750 мВт, которая ограничивалась длиной полупроводникового кристалла (1 мм) и невысокими теплоотводящими свойствами теплообменника. Дальнейший рост мощности возможен при увеличении числа диодов и их длины, а также улучшении свойств теплообменника.

Авторы выражают благодарность О.Parriaux и S.Tonchev (Laboratoire Hubert Curien, Université Jean Monnet, Saint-Etienne, France) за изготовление ВРЗ, а также С.М.Сапожникову и А.И.Данилову (НИИ «Полус») за изготовление полупроводниковых активных элементов.

Работа выполнена при поддержке ООО «Новые энергетические технологии» (госконтракт № 14.740.11.0073).

1. Лындин Н.М., Сычугов В.А., Тихомиров А.Е., Абрамов А.А. *Квантовая электроника*, **21** (12), 1141 (1994).
2. Глова А.Ф. *Квантовая электроника*, **33** (4), 283 (2003).
3. Paboeuf D., Lucas-Leclin G., Georges P., Michel N., Krakowski M., Lim J., Sujecki S., Larkins E. *Appl. Phys. Lett.*, **93** (21), 211102 (2008).
4. Volodin B.L., Dolgy S.V., Melnik E.D., Downs E., Shaw J., Ban V.S. *Opt. Lett.*, **29** (16), 1891 (2004).
5. Голубенко Г.А., Свахин А.С., Сычугов В.А., Тищенко А.В. *Квантовая электроника*, **12** (7), 1334 (1985).
6. Wang S.S., Magnusson R. *Appl. Opt.*, **34** (14), 2414 (1995).
7. Rosenblatt D., Sharon A., Friesem A.A., *IEEE J. Quantum Electron.*, **33** (11), 2038 (1997).
8. Lyndin N.M., Nurligareev J.Kh., Sychugov V.A., Usievich B.A., Zvonkov N.B. *Proc. ECIO-99* (Torino, Italy, 1999, p.343–346).
9. Avrutsky I., Rabaday R. *Opt. Lett.*, **26** (13), 989 (2001).
10. www.mcgrating.com