

УПРАВЛЕНИЕ ПАРАМЕТРАМИ ЛАЗЕРНОГО ИЗЛУЧЕНИЯ

Фазировка диодной линейки с использованием фазового дифракционного зеркала

С.И.Державин, Н.М.Лындин, В.Н.Тимошкин

Предложен метод синхронизации излучения линейки лазерных диодов с помощью фазового дифракционного зеркала. Экспериментально подтверждено, что он обеспечивает сфазированный режим излучения линейки, но не обладает достаточными селективными свойствами для обеспечения устойчивой генерации в одномодовом режиме.

Ключевые слова: лазерные диоды, фазировка.

Фазировка (синхронизация) диодных лазеров – когерентное сложение их излучения – является одним из перспективных направлений разработки мощных полупроводниковых лазеров с высоким качеством пучка (в частности, с низкой расходимостью). К настоящему времени было предложено и исследовано множество различных методов и схем фазировки, наилучшие результаты были получены в схемах, использующих внешний резонатор [1]. Он создает оптическую связь между диодами из набора, помещенного внутри него, за счет отвода части излучения каждого диода в другие, тем самым формируя синхронный режим их генерации. Однако обратной стороной использования внешнего резонатора является возбуждение в нем коллективных мод (супермод) совокупного излучения, число которых определяется числом вовлеченных в совместную генерацию диодов. Поэтому, чтобы получить одномодовый суммарный выходной пучок излучения, сфазированного внешним резонатором, необходимо также добиться выделения (селекции) одной супермоды. Именно эта проблема и остается основной на современном этапе исследований фазировки диодных лазеров. Сложность ее решения обусловлена близостью порогов генерации различных супермод. Это объясняет недостаточную эффективность многих предложенных ранее способов их селекции и требует разработки новых.

В настоящей статье представлены результаты экспериментальных исследований метода синхронизации излучения линейки лазерных диодов с помощью фазового дифракционного (решетчатого) зеркала (рис.1), теоретически предложенного в [2]. Согласно этому методу, линейка помещается во внешний резонатор, образованный фурье-объективом 6 и фазовым дифракционным зеркалом 7, которое служит выходным зеркалом и располагается в фокальной плоскости объектива. Линейка лазерных диодов 2 имеет глухое заднее зеркало 1 и просветляющее покрытие на выходной апертуре 4. Излучение диодной линейки фокусируется фурье-объективом непосредственно на зеркало. Этот объектив осуществляет пря-

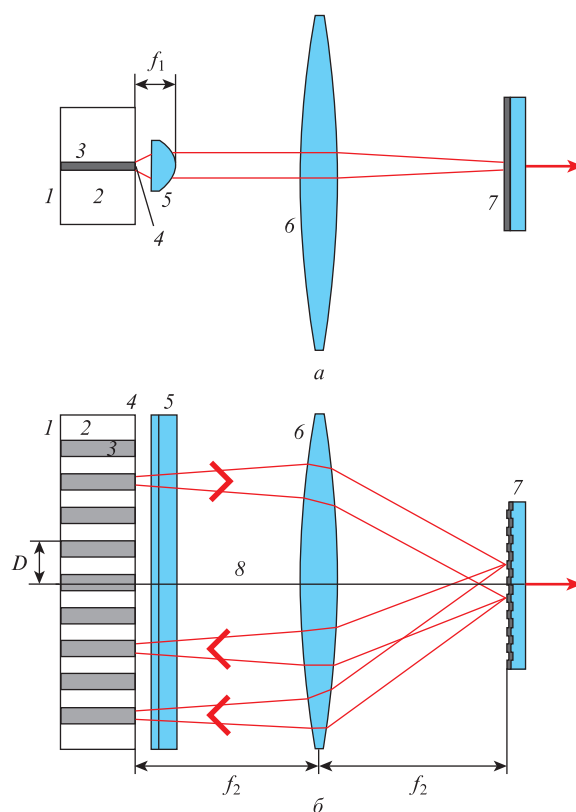


Рис.1. Схема фазировки с использованием фазового дифракционного зеркала и фурье-оптики: вид сбоку (а), вид сверху (б); 1 – глухое заднее зеркало линейки диодов; 2 – линейка лазерных диодов; 3 – отдельный диод; 4 – выходная апертура линейки; 5 – коллимирующая линза с фокусным расстоянием f_1 ; 6 – объектив с фокусным расстоянием f_2 ; 7 – отражающая фазовая дифракционная решетка; 8 – оптическая ось системы. Линиями показаны границы пучков ± 1 -х дифракционных порядков от одного лазерного диода.

мое фурье-преобразование падающего излучения линейки, а после его отражения от фазового зеркала – обратное фурье-преобразование, в результате чего отраженный и преобразованный образ излучающего торца линейки 4 накладывается на него самого в зеркально повернутом относительно оптической оси схемы положении. Таким образом, излучение одной половины диодов линейки по-

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

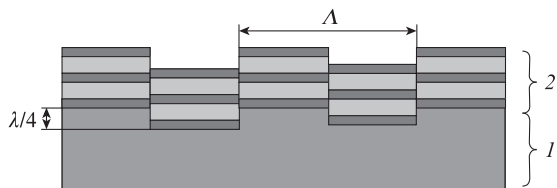


Рис.2. Структура фазового дифракционного зеркала: 1 – подложка; 2 – многослойное покрытие.

падает на диоды противоположной – тем самым организуется их оптическая связь. Одновременно с этим фурье-объектив выполняет функцию селективного элемента – осуществляет фильтрацию высоких пространственных гармоник.

Фазовое дифракционное зеркало представляет собой отражающую дифракционную решетку, которая нанесена на прозрачную подложку 1 с гофрированной поверхностью 2 (рис.2). Период прямоугольного гофра $\Lambda = \lambda D / f_2$, где D – расстояние между соседними лазерными диодами линейки, f_2 – фокусное расстояние фурье-объектива, а глубина канавок равна четверти рабочей длины волны λ в вакууме. На эту подложку нанесено многослойное диэлектрическое зеркальное покрытие с коэффициентом отражения, рассчитанным по рабочему значению λ .

При указанных параметрах гофра такое дифракционное зеркало обеспечивает подавление отражения нулевого порядка дифракции падающей плоской волны и равенство амплитуд ± 1 -х порядков дифракции. Равенство фаз ± 1 -х порядков дифракции обеспечивается при условии симметричного расположения решетки относительно оптической оси всей системы. Оценочные расчеты показывают, что эти порядки могут содержать до 80% мощности всего отраженного излучения.

Отметим, что мы уже применяли многослойную дифракционную структуру для фазировки излучения диодной линейки в исследованном нами ранее методе с использованием резонансного волноводного зеркала [3, 4], который продемонстрировал хорошую эффективность. Причем резонансное волноводное зеркало имело более сложную структуру, чем фазовое зеркало.

Механизм синхронизации линейки лазерных диодов с использованием фазового дифракционного зеркала состоит в следующем. Излучение каждого лазерного диода, отражаясь от зеркала, расщепляется на два пучка (± 1 -е отраженные дифракционные порядки), а потому попадает не только на своего зеркального партнера в линейке, как это было бы в случае обычного плоского зеркала, а на два соседних с ним лазерных диода (см. рис.1,б). В результате на каждый диод линейки приходит излучение от двух других диодов (исключение составляют лишь диоды, расположенные на краях линейки). На рис.3 показана схема оптической взаимосвязи (двунаправленного обмена энергией излучения) лазерных диодов для нечетного и для четного их числа. В случае нечетного числа

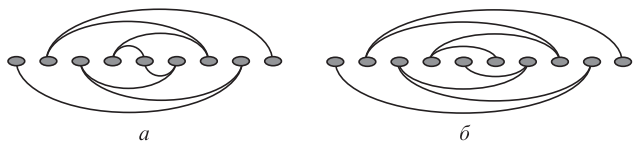


Рис.3. Схема оптических связей лазерных диодов линейки, устанавливающихся посредством фазового дифракционного зеркала при нечетном (а) и четном (б) числе диодов.

лазерных диодов и при общей симметрии оптической схемы все диоды линейки объединяются в единый составной излучатель в общем внешнем резонаторе.

Чтобы обеспечить конструктивную интерференцию и максимальное усиление лазерным диодом пришедшего излучения, пучки света, попадающие на каждый отдельный лазерный диод от двух других диодов, должны быть когерентны, и их фазы должны совпадать. Указанное выше условие равенства фаз ± 1 -х порядков дифракции как раз и обеспечивает выполнение этого требования. При синфазной генерации всех лазерных диодов распределение мощности на фазовом зеркале имеет типичный вид дифракции от амплитудной решетки, при этом все главные максимумы целиком располагаются либо на гребнях, либо на впадинах решетки. При этом в выходном (прошедшем через зеркало) излучении соотношение фаз главных максимумов остается неизменным, что означает минимальное влияние фазового решеточного зеркала на пространственное распределение выходного излучения, которое определяется только геометрическими параметрами линейки лазерных диодов.

Другим достоинством описанного метода является подавление генерации отдельных диодов при обратной связи «сам на себя» – в нем принципиально возможна только коллективная генерация последовательно связанных диодов. Кроме того, теоретически этот метод не должен быть чувствителен к коэффициенту заполнения (филл-фактору) диодной линейки. Чтобы проверить эту особенность метода и заодно получить большие мощности, мы проводили исследование данного метода фазировки с линейкой широкоапертурных диодов. Однако для диодов такого типа характерно фрагментирование излучения в активной среде (филаментация), которое приводит к появлению дополнительных мод [5]. В связи с этим также ставилась задача проверки возможностей метода по подавлению влияния филаментации.

В наших экспериментах использовалась диодная линейка со средней рабочей длиной волны 947 нм при комнатной температуре (она была отобрана из партии одинаковых линеек как имевшая наибольшую однородность распределения излучения вдоль ее длинной стороны), номинальной мощностью излучения 20 Вт. Линейка состояла из набора субмезоструктур шириной 200 мкм и с расстоянием между ними 200 мкм, общая ее ширина была равна 10 мм. Задняя грань линейки имела 100%-ное отражающее покрытие, передняя (излучающая) была просветлена и имела пропускание 99.5%. Общее число одиночных диодных лазеров в линейке было равно 25, длина резонатора каждого из них составляла 1 мм. Выбор параметров линейки был связан еще и с тем, что при указанных их значениях в качестве фурье-объектива можно было использовать стандартный фотообъектив (в наших экспериментах – фотообъектив ГЕЛИОС 44М с фокусным расстоянием 58.6 мм). Уменьшение периода расположения диодов в линейке, учитывая обусловленные особенностями схемы фазировки aberrации, потребовало бы разработки и изготовления специального объектива с малым (менее 10 мм) фокусным расстоянием.

Необходимая по ходу экспериментов коррекция длины волны проводилась посредством изменения рабочей температуры линейки. Для эффективного охлаждения линейка монтировалась индиевым припоем на массивное золоченое медное основание, установленное на теплообменник Пельтье, способный отводить до 50 Вт тепловой

мощности. Такая избыточная мощность теплообменника позволяла минимизировать влияние температурных флуктуаций и надежно удерживать требуемое значение длины волны излучения линейки. Микротермистор, закрепленный в непосредственной близости от линейки, позволял стабилизировать температуру линейки с точностью 0.1°C , что соответствует фиксации длины волны излучения лазерных диодов с точностью 0.3 нм .

Фазовое дифракционное зеркало было изготовлено на стеклянной (K8) подложке, в поверхности которой была вытравлена и напылена отражающая фазовая дифракционная решетка с прямоугольным профилем. Ширина и глубина канавок были равны ширине выступов и составляли 0.202 мм при средней погрешности $\pm 5\text{ нм}$.

Чтобы снизить потери энергии излучения, производилась коллимация пучка линейки в направлении, перпендикулярном плоскости р–п-перехода. Для этого использовалась кварцевая асферическая цилиндрическая микролинза (5 на рис.1), имевшая числовую апертуру 0.8 и пропускание более 99% . Она жестко крепилась перед излучающей гранью линейки с помощью УФ-отверждаемого клея.

В части экспериментов для улучшения селекции коллективных мод сфазированного излучения перед дифракционным зеркалом перпендикулярно направлению длинной стороны диодной линейки устанавливалась оптическая щель. С помощью щели мы также пытались подавить образование филаментов и получить гладкий профиль распределения излучения каждого диода в линейке.

В экспериментах исследовались распределения поля и спектральный состав излучения лазерной диодной линейки во внешнем резонаторе, образованном фазовым дифракционным зеркалом, при различных режимах и параметрах накачки. На рис.4 показан характерный вид наблюдавшегося в экспериментах профиля распределения мощности сфазированного излучения на выходе (в относительных единицах).

Профиль распределения, регистрируемый при одних и тех же значениях параметров системы и накачки, каждый раз заметно отличался от ранее полученного при новых повторениях измерений, что указывало на очень большую чувствительность схемы фазировки к флуктуациям поля излучения (порождаемым естественными и неустранимыми флуктуациями температуры и тока накачки). Эти флуктуации приводят к слабым фазовым сдвигам, нарушающим условие равенства фаз ± 1 -х порядков дифракции, что оказалось достаточным для искажения профиля распределения.

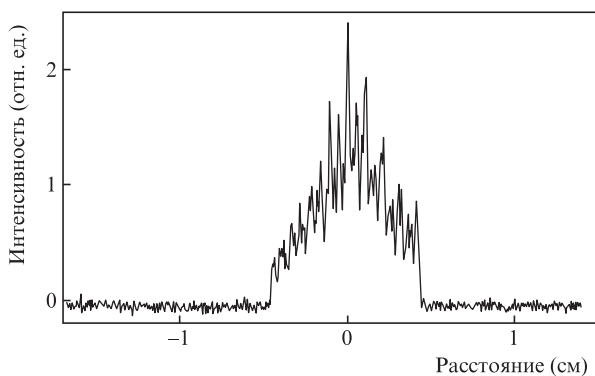


Рис.4. Распределение мощности выходного излучения в плоскости фазового дифракционного зеркала; ток накачки 15 А , длительность импульса 40 мкс , частота следования импульсов 250 Гц .

Характер распределения на рис.4 подтверждает, что схема с фазовым дифракционным зеркалом обеспечивает генерацию лазерной диодной линейки в сфазированном режиме. Причем увеличение тока накачки приводило к увеличению числа вовлеченных в режим сфазированной генерации лазерных диодов. На это указывало как уменьшение ширины пиков в профиле распределения излучения, так и переход к более пологому профилю распределения излучения при увеличении тока накачки. Вместе с тем, вид профиля распределения поля на рис.4 показывает, что характер излучения является существенно многомодовым. Никакие изменения параметров накачки диодной линейки, а также вариация параметров оптических элементов не позволили добиться устойчивой селекции коллективных мод генерации. Введение внутрь резонатора дополнительного селективного элемента – оптической щели, располагавшейся практически в фокусе фурие-объектива, – приводило лишь к обрезанию области обратной связи и к уменьшению числа участвующих в генерации лазерных диодов линейки. Отметим, что сильная изрезанность профилей пиков на рис.4 обусловлена влиянием филаментации.

Пример экспериментально измеренного спектра излучения диодной линейки, сфазированного с помощью дифракционного зеркала, представлен на рис.5. Он однозначно указывает на многомодовый состав излучения. В экспериментах наблюдалась слабая зависимость вида выходного спектра сфазированной линейки от величины тока накачки, что говорило о незначительной разнице порогов генерации различных супермод. Таким образом, расчет на уменьшение порога генерации синфазной моды за счет конструктивного сложения пучков с нулевой разностью фаз не подтвердился.

Максимальные достигнутые значения пиковой мощности излучения линейки в сфазированном режиме составили около 1.2 Вт .

В дополнение к экспериментальным исследованиям, чтобы установить, какие из полученных результатов были обусловлены собственными особенностями изучавшегося способа фазировки, а какие – погрешностями эксперимента, нами было выполнено численное моделирование распределения мощности излучения сфазированной линейки в плоскости фазового зеркала. Для этого задавались различные характерные распределения исходного поля излучения на торце линейки лазерных диодов: одномодовое распределение; распределение с имитацией случайных филаментов; синфазное по всей линейке, но с дисперсией

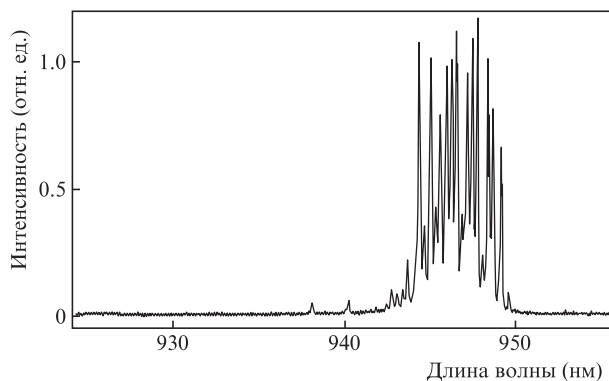


Рис.5. Спектр излучения сфазированной диодной линейки; ток накачки 15 А , длительность импульса 40 мкс , частота следования импульсов 250 Гц .

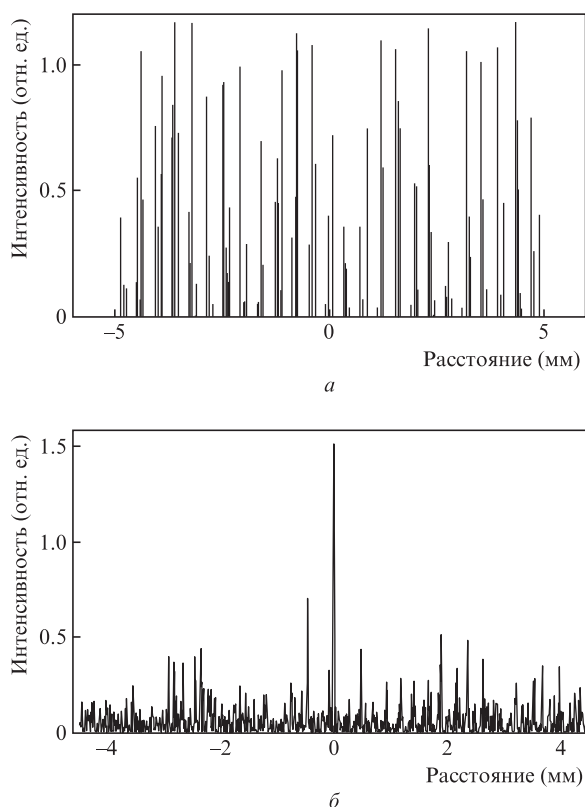


Рис.6. Распределение излучения филаментированных лазерных диодов при случайном изменении фаз в интервале $0-\pi$ на излучающем торце линейки (а) и на фазовом зеркале (б).

фазы на отдельных структурных элементах излучающего поля. Для модельного распределения поля вычислялось быстрое преобразование Фурье, результат которого давал распределение поля на фазовом зеркале. При моделировании использовались те же значения параметров элементов схемы фазировки, что и в экспериментах. Типичный вид полученных расчетных распределений мощности излучения (в относительных единицах) в нормальном сечении пучка представлен на рис.6.

Численное моделирование показало, что при фазировке всей линейки, вне зависимости от того, работают ли отдельные диоды в одномодовом режиме или в режиме филаментации излучения, в распределении излучения на фазовом зеркале должны наблюдаться резкие узкие пики излучения, соответствующие дифракции от всей апертуры линейки лазерных диодов (рис.6,б). В экспериментах эти пики были слабо выражены (см. рис.4), из чего следует сделать вывод, что наблюдавшаяся в экспериментах синхронизация излучения линейки лазерных диодов была частичной: синхронная мода всей линейки генерировалась на фоне достаточно сильного несинхронизованного излучения. Также расчеты показали, что диаграмма направленности выходного излучения является многолепестковой.

Полученные результаты позволяют заключить, что в схеме фазировки линейки лазерных диодов во внешнем резонаторе, образуемом фазовым дифракционным зеркалом, устанавливается оптическая связь диодов линейки, которая обеспечивает коллективную генерацию (фазировку) всех диодов в линейке. Вместе с тем фазировка излучения лазерной диодной линейки по этой схеме сопровождается неустранимой генерацией большого числа супермод. Ожидалось, что селекция коллективных мод в схеме фазировки с фазовым зеркалом обеспечит значительное уменьшение порога генерации синфазной супермоды за счет конструктивного сложения излучения отдельных диодов линейки, излучающих с нулевой разностью фаз. Однако какого-либо значительного различия в порогах генерации супермод в схеме с фазовым дифракционным зеркалом не наблюдалось.

Различные вариации режимов работы диодной линейки и/или параметров резонатора и составляющих его оптических элементов не смогли обеспечить устойчивое выделение какой-либо одной супермоды, что связано с высокой чувствительностью метода к флуктуациям поля излучения. Дополнительная установка оптической щели непосредственно вблизи от фазового дифракционного зеркала не способствовала селекции мод, а лишь уменьшала количество участвующих в коллективной генерации лазерных диодов. Спектр излучения лазерной диодной линейки, сфазированной в схеме с фазовым дифракционным зеркалом, не является монохромным, что указывает на значительное количество супермод в излучении сфазированной линейки. Таким образом, схема фазировки лазерной диодной линейки с помощью фазового дифракционного зеркала не позволила получить режим сфазированной генерации лазерной диодной линейки с устойчивым выделением одной супермоды.

Наблюдавшаяся невысокая эффективность фазировки с использованием фазового зеркала отчасти могла быть обусловлена использованием широкоапертурных диодов. Сравнение результатов данного метода и метода с использованием резонансного волноводного зеркала [3,4] однозначно указывает на значительное превосходство второго по всем основным показателям: количеству сфазированных диодов, качеству и стабильности излучения, мощности и расходимости пучка. Но в экспериментах с резонансным волноводным зеркалом использовалась линейка узкоапертурных одномодовых диодов. Поэтому представляется целесообразным в дальнейших исследованиях по фазировке использовать именно такой тип лазерных диодов.

1. Глова А.Ф. *Квантовая электроника*, **33**, 283 (2003) [*Quantum Electron.*, **33**, 283 (2003)].
2. Державин С.И., Лындин Н.М. Патент RU № 2433516 C2 по заявке 2009143964/28 от 27.11.2009.
3. Державин С.И., Дюкель О.А., Лындин Н.М. *Квантовая электроника*, **42**, 561 (2012) [*Quantum Electron.*, **42**, 561 (2012)].
4. Державин С.И., Лындин Н.М., Тимошкин В.Н. и др. *Электромагнитные волны и электронные системы*, **8**, 19 (2017).
5. Salzman J., Larsson A., Yariv A. *Appl. Phys. Lett.*, **49**, 611 (1986).