

## Формирование пучков с неоднородной поляризацией излучения в непрерывном волноводном терагерцевом лазере

О.В.Гурин, А.В.Дегтярев, Н.Н.Дубинин, М.Н.Легенький,  
В.А.Маслов, К.И.Мунтян, В.Н.Рябых, В.С.Сенюта

*Описан основанный на использовании в качестве лазерных зеркал поляризационно-селективных дифракционных структур способ получения в волноводном квазиоптическом резонаторе негауссовых световых пучков излучения с азимутальной поляризацией поля. Теоретически и экспериментально подтверждено эффективное возбуждение таких пучков на выходе оптически накачиваемого волноводного НСООН-лазера ( $\lambda = 0.4326$  мм) с неоднородными отражающим входным и полупрозрачным выходным зеркалами.*

*Ключевые слова:* терагерцевый диапазон, волноводный лазер, непрерывное излучение, формирование пучка, неоднородное зеркало, азимутальная поляризация.

### 1. Введение

Выходное излучение большинства современных лазеров является поляризационно-однородным. Однако в настоящее время наблюдается рост интереса к оптическим полям с неоднородной пространственной поляризацией, которые в научной литературе известны как «векторные пучки» [1–3]. Среди них лазерные пучки с радиальной и азимутальной поляризацией, обладающие особыми свойствами, все чаще используются во многих исследовательских и прикладных задачах. С учетом особенностей их распространения и фокусировки такие пучки находят применение в лазерной физике [4], биомедицинской диагностике [5], в технологических процессах обработки металлов [6], высокоскоростной связи [7], для ускорения электронов [8] и др.

Различные типы мод с неоднородной пространственной поляризацией поля формируются с использованием как внerezонаторных, так и внутррезонаторных методов [9]. Принцип действия поляризационных устройств основан на локальном изменении состояния поляризации в каждой точке поперечного сечения лазерного пучка. Внerezонаторные методы, как правило, используют когерентную суперпозицию пары мод свободного пространства, например, с помощью интерферометра [10]. Важным достоинством внerezонаторных методов является их универсальность, недостатком – сложность реализации и высокая чувствительность к внешним условиям. Внутррезонаторные методы основаны на модификации лазерных резонаторов, позволяющей устранить эти ограничения. В последнее время в оптике развивается направление, связанное с использованием дифракционных зеркал

с высокой поляризационной селективностью. Специальный рисунок их рельефа обеспечивает максимальную добротность моды с заданным направлением поляризации [11–13]. Однако эти методы ориентированы на конкретный тип поляризации излучения.

Упомянем несколько работ, посвященных изучению генерации, распространения и фокусировки пучков с различной пространственной поляризацией излучения в терагерцевом (ТГц) диапазоне частот [14–18], а также работы [19–25], в которых описывались методы и подходы для формирования лазерных пучков с необходимой поляризационной структурой в этом диапазоне. Однако все они относятся к группе внerezонаторных методов и используют импульсное излучение, полученное при нелинейном преобразовании излучения ИК фемтосекундных лазеров.

В настоящей работе мы сообщаем о новом внутррезонаторном методе генерации непрерывных лазерных пучков ТГц диапазона с азимутальной поляризацией излучения с применением поляризационно-селективных азимутально-симметричных дифракционных структур в качестве зеркал волноводного молекулярного лазера с оптической накачкой. В предлагаемом методе используется входное зеркало резонатора, выполненное в виде отражающей крупномасштабной ( $\kappa = l/\lambda > 1$ , где  $\lambda$  – длина волны, а  $l$  – период структуры) металлической дифракционной решетки, или выходное полупрозрачное зеркало – в виде металлической мелкомасштабной ( $\kappa < 1$ ) многокольцевой диафрагмы, которая расположена на диэлектрическом слое. Настоящая работа проведена с целью разработки, создания и исследования экспериментального образца ТГц лазера для получения пучков излучения с азимутальной поляризацией на основе волноводного резонатора с такими зеркалами.

### 2. Экспериментальная установка

Структурная схема волноводного ТГц лазера с оптической накачкой и экспериментальной установки для его исследования представлена на рис.1. Для возбуждения

О.В.Гурин, А.В.Дегтярев, Н.Н.Дубинин, М.Н.Легенький, В.А.Маслов, К.И.Мунтян, В.Н.Рябых, В.С.Сенюта. Харьковский национальный университет им. В.Н.Каразина, Украина, 61022 Харьков, пл. Свободы, 4; e-mail: v.a.maslov@karazin.ua

Поступила в редакцию 18 декабря 2020 г., после доработки – 27 января 2021 г.

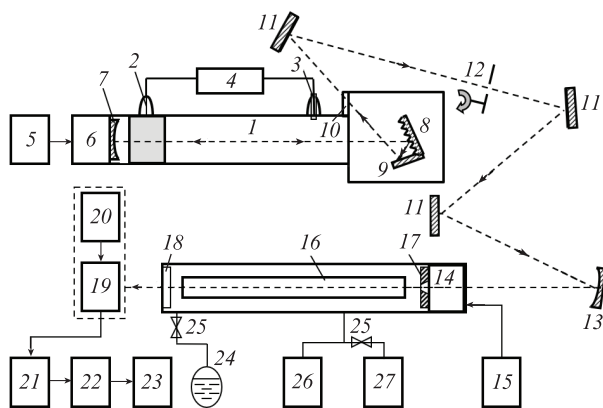


Рис.1. Схема экспериментальной установки:  
 1 – CO<sub>2</sub>-лазер; 2 – катод; 3 – анод; 4 – высоковольтный источник питания; 5 – источник постоянного напряжения; 6 – пьезоэлемент; 7, 13 – сферические зеркала; 8 – эшелетт; 9 – уголкового отражатель; 10 – пластина из NaCl; 11 – плоские зеркала; 12 – механический модулятор; 14 – механизм перемещения зеркала; 15 – электродвигатель; 16 – диэлектрический волновод; 17 – входное зеркало; 18 – выходное зеркало; 19 – детектор; 20 – устройство сканирования пучка; 21 – селективный усилитель; 22 – АЦП; 23 – компьютер; 24 – колба с HCOOH; 25 – вентили; 26 – вакууметр; 27 – вакуумный насос.

рабочей молекулы HCOOH-лазера используется работающий в непрерывном режиме генерации с разрядом постоянного тока CO<sub>2</sub>-лазер, описанный в [26].

Система поворотных зеркал, состоящая из трех плоских зеркал 11 и сферического зеркала 13 с фокусным расстоянием 0.5 м, обеспечивает фокусировку излучения CO<sub>2</sub>-лазера на отверстии связи входного зеркала 17 резонатора ТГц ячейки. Такая система ввода излучения накачки в ТГц ячейку обеспечивает хорошую развязку CO<sub>2</sub>-лазера от его излучения, отраженного ячейкой.

Терагерцевая ячейка представляет собой вакуумную камеру, выполненную из круглой пирексовой трубки 16 внутренним диаметром 35 мм и длиной 1848 мм, закрытую зеркалами 17 и 18. Профили поверхностей этих зеркал выбраны исходя из необходимости получения заданной поперечной моды генерации. Зеркало 17 имеет центральное отверстие связи диаметром 3 мм для ввода излучения накачки в ТГц ячейку. Проведенные расчеты показали, что при таком диаметре отверстия связи поле на зеркале 17 практически не отличается от поля на зеркале без отверстия. Входное зеркало закреплено в механизме плоскопараллельного сдвига 14, что позволяет перемещать его на расстояние более 2 мм с сохранением параллельности не хуже 10'. Автоматическое перемещение зеркала осуществляется с помощью электродвигателя 15.

Параметры неоднородных зеркал волноводного квазиоптического диэлектрического резонатора лазера предварительно рассчитывались с использованием численного алгоритма BOR FDTD (детали численной схемы описаны в [27]). Данный алгоритм позволил рассчитать коэффициенты отражения и пропускания как симметричных, так и несимметричных волноводных мод с различной пространственной поляризацией поля для аксиально-симметричных дифракционных зеркал, расположенных внутри полого круглого диэлектрического волновода.

Система откачки и заполнения рабочей смеси ТГц ячейки включает в себя элементы 24 – 27. Такая конструкция обеспечивает поддержание давления рабочей смеси в ТГц ячейке на уровне ~1 дПа. Система регистрации ТГц

излучения состоит из пироэлектрического приемника 19 с пространственным разрешением 0.2 мм, установленного в специальном электромеханическом устройстве, которое позволяет сканировать поперечное распределение выходной интенсивности лазерного излучения по заданным азимутам. Приемник мог располагаться на расстоянии, варьируемом в диапазоне 100 мм–1.5 м от выходного зеркала 18 ТГц ячейки. Сигнал детектора усиливался селективным усилителем 21 и поступал на АЦП 22 и компьютер 23.

Мощность излучения ТГц лазера определялась болометрическим измерителем мощности БИМО-1, а мощность CO<sub>2</sub>-лазера – калориметрическим измерителем мощности ИМО-2Н. Методика измерений спектральных параметров аналогична описанной в [28]. Спектр собственных мод резонатора регистрировался при изменении длины резонатора электроприводом 15. Поперечные моды идентифицировались по межмодовым интервалам, которые рассчитывались по фазовым сдвигам мод за круговой обход резонатора, а также по известным из теории поперечным распределениям интенсивности и состояниям поляризации волноводных мод [29, 30].

Состояние поляризации генерируемой моды определялось следующим образом. Приемник излучения с малой входной диафрагмой перемещался по различным азимутам в поперечной плоскости пучка излучения, и в точках максимума излучения с помощью поляризатора определялось положение плоскости поляризации. В качестве последнего использовалась одномерная проволочная решетка с шагом 40 мкм и диаметром проволоки 8 мкм.

### 3. Сравнение экспериментальных и численных результатов

#### 3.1. Лазерный резонатор с входным крупномасштабным и выходным однородным зеркалами

Для возбуждения азимутально поляризованного излучения в волноводном квазиоптическом резонаторе ТГц лазера необходимо, чтобы его зеркала обладали высокой селективностью и обеспечивали минимальные энергетические потери для требуемой моды и большие потери для нежелательных мод.

Роль выходного однородного зеркала резонатора 18 (рис.1) выполняла емкостная двумерная сетка, изготовленная напылением алюминия через матрицу на плоскопараллельную пластину кристаллического кварца толщиной 4 мм. В качестве матрицы использовалась индуктивная ленточная сетка с периодом 103 мкм и шириной ленты 17 мкм. Такое зеркало имеет прозрачность 18% на рабочей длине волны лазера 0.4326 мм. Входным отражателем 17 служило неоднородное зеркало с центральным отверстием связи диаметром  $d = 3$  мм. Отражающая поверхность этого зеркала была выполнена в виде азимутально-симметричной крупномасштабной металлической дифракционной решетки с различным числом отражающих колец и поглощающих излучение канавок шириной  $b$  с заданным периодом  $l$ . Для выполнения условия коротковолнового приближения,  $l > \lambda$ , период решетки  $l$ , исходя из технологических возможностей, был выбран равным 1.75 мм. Коэффициент заполнения решетки  $\eta = b/l$  изменялся в диапазоне 0.1 – 0.9.

Проведенные расчеты зависимости коэффициента отражения для волноводных TE<sub>01</sub>- и EH<sub>11</sub>-мод с наимень-

шими потерями от коэффициента заполнения аксиально-симметричного дифракционного зеркала, расположенного внутри полого круглого диэлектрического волновода, показали, что размещение зеркала с дифракционной решеткой на поверхности при  $\eta > 0.8$  в волноводе для азимутально поляризованного типа колебаний  $TE_{01q}$  позволяет получить коэффициент отражения  $R \geq 60\%$ , а для моды  $EH_{11}$  с линейной поляризацией – менее 50%. Это способствует селективному возбуждению в лазерном резонаторе с исследуемым зеркалом моды  $TE_{01q}$ .

С учетом результатов расчетов неоднородное входное зеркало было изготовлено механическим методом с помощью специального резака. Оно имело вид девяти чередующихся отражающих колец и поглощающих излучение канавок с периодом  $l = 1.75$  мм и шириной  $b = 0.35$  мм. Профиль отражателя, используемого в эксперименте, показан на рис.2. Поглощающие канавки протачивались резцом на глубину  $\sim 0.2$  мм ( $\sim 0.5\lambda$ ) под углом  $30^\circ$  к плоскости отражающей поверхности зеркала. Это обеспечивало вывод отраженных от поверхности канавок лучей из резонатора лазера, что аналогично практически полному поглощению излучения на этих участках зеркала.

На рис.3 приведены спектры возбуждаемых мод лазера, полученные экспериментально при использовании указанного входного неоднородного зеркала и выходного однородного емкостного зеркала. При перестройке длины резонатора наблюдаются две низшие по потерям резонаторные моды. Вторая по добротности мода имеет линейную поляризацию, и на основании ее поперечного распределения интенсивности поля она идентифицирована нами как  $EH_{11q}$ -мода. Частотное расстояние между

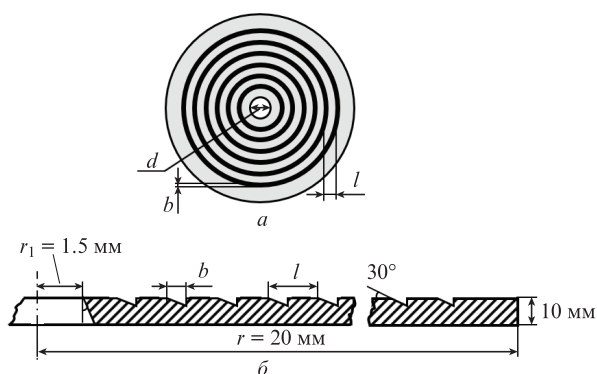


Рис.2. Профиль входного дифракционного зеркала: рельеф поверхности зеркала (а) и поперечное сечение зеркала (б).

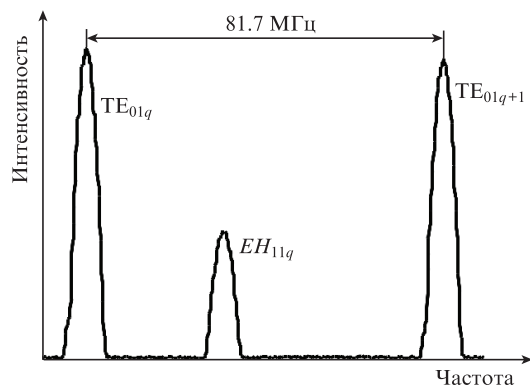


Рис.3. Спектр мод НСООН-лазера с входным отражающим крупномасштабным зеркалом.

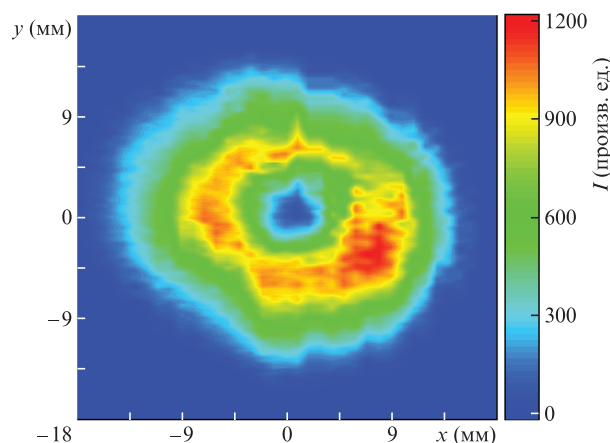


Рис.4. Экспериментальное поперечное распределение интенсивности излучения  $I$  на выходе НСООН-лазера с входным крупномасштабным зеркалом в дальней зоне для  $TE_{01q}$ -моды. Цветной вариант рис.4 помещен на сайте нашего журнала <http://www.quantum-electron.ru>.

$EH_{11q}$ -модой и наиболее добротной модой указывает (согласно теоретическим расчетам) на то, что это мода  $TE_{01q}$ . Поперечное распределение интенсивности поля этой моды в дальней зоне на выходе лазера показано на рис.4. На основании полученного поперечного распределения, межмодового расстояния по частоте и положения вектора электрического поля для разных азимутов эта мода идентифицирована как  $TE_{01q}$ -мода с азимутальной поляризацией излучения.

Мощность излучения ТГц лазера в моде  $TE_{01q}$  составляет 8 мВт, а в моде  $EH_{11q}$  – 3.75 мВт. При замене дифракционного зеркала на однородное мощность излучения лазера на моде  $EH_{11q}$  составила 18 мВт. Уменьшение мощности излучения на этой моде в случае использования неоднородного зеркала обусловлено уменьшением коэффициента отражения моды от данного зеркала.

Как видно, предложенное отражающее азимутально-симметричное крупномасштабное дифракционное зеркало эффективно селективирует нежелательные моды и отличается простотой реализации в лабораторных условиях. Однако, учитывая его невысокую энергетическую эффективность, дальнейшие исследования проводились при размещении на поверхности зеркал мелкомасштабных дифракционных структур.

### 3.2. Лазерный резонатор с входным однородным и выходным мелкомасштабным зеркалами

В этом случае на входе в лазерный резонатор в качестве зеркала 17 (см. рис.1) устанавливалось плоское однородное алюминиевое зеркало с отверстием связи диаметром 3 мм, а в качестве выходного полупрозрачного отражателя лазера 18 пробовались два варианта дифракционного зеркала. В первом варианте (зеркало I) поверхность зеркала была выполнена методом фотолитографии в виде азимутально-симметричной металлической мелкомасштабной ( $\kappa < 1$ ) многокольцевой диафрагмы, расположенной на диэлектрическом слое. Для выполнения условия длинноволнового приближения ( $l < \lambda$ ) период диафрагмы  $l$  выбран равным 120 мкм. На рис.5 приведены зависимости коэффициентов отражения  $R$  и пропускания  $T$  диафрагмы для волноводных мод  $TE_{0m}$  и  $EH_{1m}$  от ее коэффициента заполнения  $\eta$  при расположении мел-

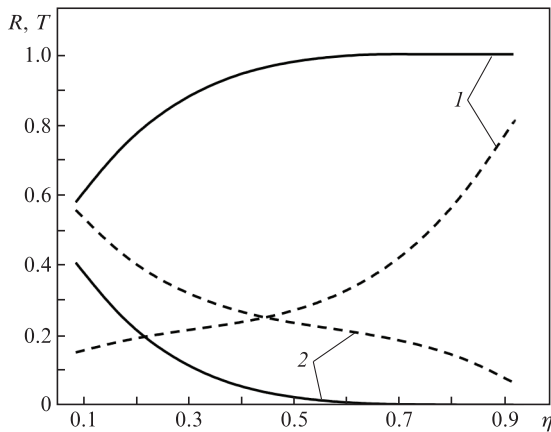


Рис.5. Расчетные зависимости коэффициентов отражения  $R$  (1) и пропускания  $T$  (2) для волноводных мод  $TE_{0m}$  (сплошные кривые) и  $EH_{1m}$  (штриховые кривые) от коэффициента заполнения  $\eta$  многокольцевой диафрагмы.

комасштабного зеркала внутри полого круглого диэлектрического волновода. В расчетах учтена толщина кварцевой подложки (4 мм в экспериментальном образце зеркала). Как видно из рис.5, введение кольцевого зеркала с  $\eta > 0.3$  приводит к значительному увеличению коэффициентов отражения ( $R \geq 90\%$ ) для азимутально поляризованных типов колебаний  $TE_{0m}$ , что способствует их генерации в лазере. При этом зеркало обеспечивает достаточно малые коэффициенты отражения ( $R \approx 30\%$ ) для линейно поляризованных  $EH_{1m}$ -мод. Здесь индекс  $m = 1-3$ , и для всех этих мод зависимости коэффициентов отражения и пропускания от коэффициента заполнения имеют вид, аналогичный представленному на рис.5. Однако такое зеркало не позволяет получить одномодовую генерацию на требуемой моде.

Для изучения возможности генерации отдельной низшей  $TE_{01}$ -моды с высокой степенью дискриминации нежелательных мод проведены расчеты зависимости коэффициентов  $R$  и  $T$  для волноводных мод от радиуса  $a_0$  «просветленной» части дифракционного зеркала с удалением из его центральной части ряда отражающих колец. Результаты расчетов представлены на рис.6. Видно, что выбор радиуса просветленной части зеркала в диапазоне  $a_0 = 6-8$  мм позволяет селективно возбудить требуемую  $TE_{01}$ -моду с  $R \approx 60\%-70\%$ , а моды  $EH_{11}$  и  $EH_{12}$  с  $R \approx 10\%$  и  $T \approx 40\%$  существенно преобразуются в другие типы колебаний. Моды  $TE_{02}-TE_{04}$  с аналогичной азимутальной поляризацией также достаточно эффективно подавляются таким зеркалом.

С учетом результатов расчетов неоднородное выходное зеркало II было изготовлено методом фотолитографии в виде многокольцевой диафрагмы, расположенной на диэлектрическом слое с удалением из центральной части ряда отражающих колец. На пластину кристаллического кварца толщиной 4 мм наносился слой алюминия толщиной 0.5–0.6 мкм, в котором вытравливались области заданной формы. Период диафрагмы  $l$  с учетом выполнения условия длинноволнового приближения равнялся 120 мкм, ширина металлизированных отражающих колец  $b$  составляла 50 мкм, коэффициент заполнения  $\eta$  был равен 0.4. Диаметр «просветленной» центральной части зеркала составил 14 мм.

При проведении экспериментов первоначально в качестве выходного зеркала 18 использовалось описанное

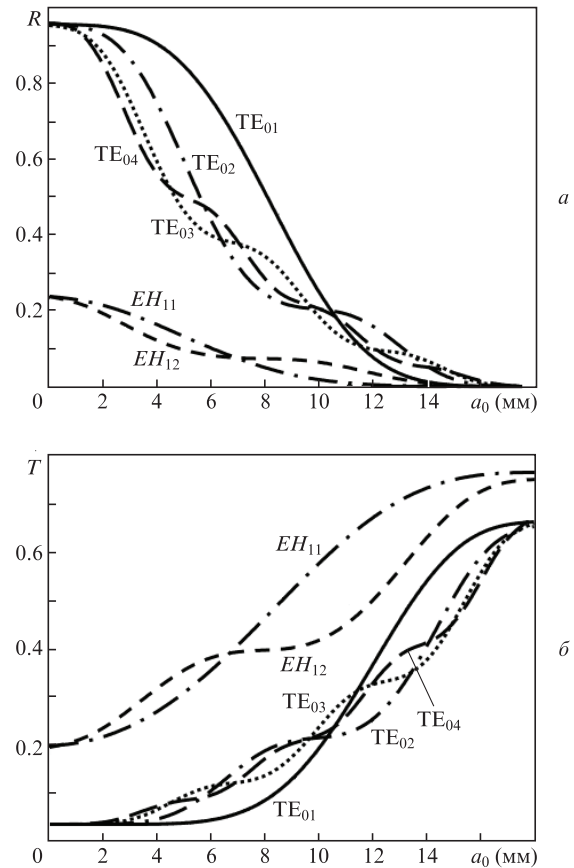


Рис.6. Зависимости коэффициентов отражения  $R$  (а) и пропускания  $T$  (б) для волноводных мод от радиуса  $a_0$  «просветленной» части зеркала.

выше однородное емкостное зеркало с прозрачностью 18% на длине волны генерации лазера. При перемещении входного зеркала 17 записывались перестроенные характеристики излучения ТГц лазера (рис.7). В спектре наблюдалось пять поперечных мод, причем четыре наиболее добротные моды имели линейную поляризацию излучения, наиболее добротная из них идентифицирована как  $EH_{11q}$ -мода.

При использовании в лазере в качестве выходного зеркала 18 зеркала I в перестроенной характеристике наблюдается шесть мод генерации (рис.8,а). При этом в спектре присутствуют три резонаторные моды с азимутальной поляризацией излучения. Наиболее добротная мода идентифицирована как  $TE_{01q}$ -мода.

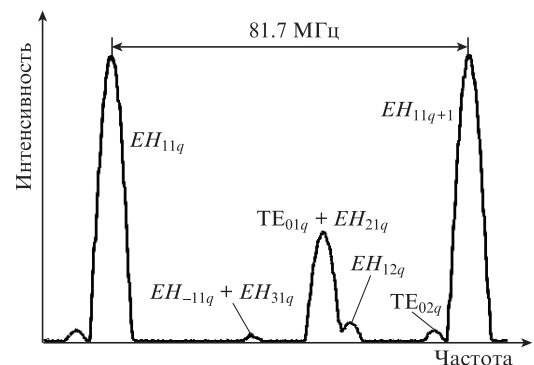


Рис.7. Спектр мод НСООН-лазера с выходным однородным емкостным зеркалом.

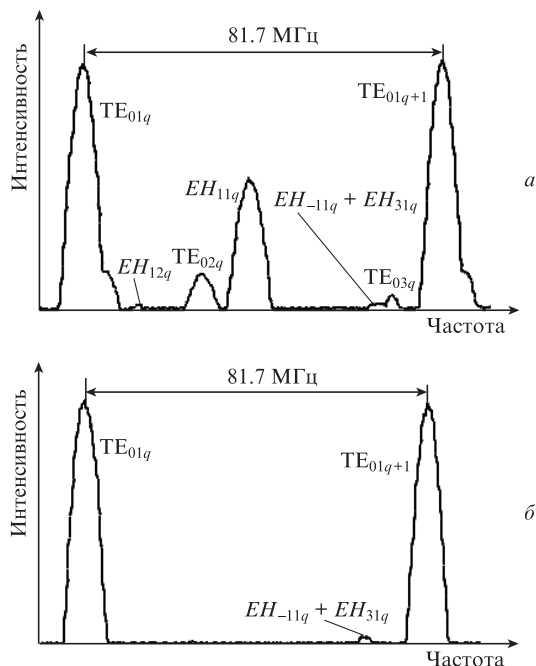


Рис.8. Спектры мод НСООН-лазера с выходными полупрозрачными мелкомасштабными дифракционными зеркалами I (а) и II (б).

Для улучшения селективных свойств резонатора лазера и генерации отдельной низшей  $TE_{01q}$ -моды с высокой степенью дискриминации нежелательных мод в лазере было использовано дифракционное зеркало II с просветленной центральной частью. На рис.8,б показан полученный экспериментально спектр мод лазера с указанной конфигурацией выходного зеркала. Видно, что использование зеркала II приводит к существенному подавлению нежелательных мод и возбуждению практически одной поперечной моды  $TE_{01q}$ . Мощность излучения при работе лазера с таким дифракционным зеркалом на моде  $TE_{01q}$  составила 16 мВт, тогда как при работе лазера на моде  $EH_{11q}$  в случае применения двумерной емкостной сетки в качестве выходного однородного зеркала она составила 18 мВт. Таким образом, применение относительно сложной дифракционной структуры на поверхности зеркала практически не привело к уменьшению мощности лазера.

Итак, теоретически и экспериментально показана возможность создания оптически накачиваемого молекулярного лазера для генерации непрерывных лазерных пучков ТГц диапазона с азимутальной поляризацией излучения с использованием поляризационно-селективных азимутально-симметричных дифракционных структур в качестве зеркал волноводного квазиоптического резонатора. Предложены две схемы получения таких пучков

на выходе оптически накачиваемого волноводного НСООН-лазера ( $\lambda = 0.4326$  мм), которые различаются энергетической эффективностью и простотой реализации.

- Piquero G., Martínez-Herrero R., de Sande J.C.G., Santarsiero M. *J. Opt. Soc. Am. A*, **37**, 591 (2020).
- Rosales-Guzmán C., Ndagano B., Forbes A. *J. Opt.*, **20**, 123001 (2018).
- Zhan Q. *Vectorial Optical Fields* (World Scientific, 2014).
- Naidoo D., Roux F.S., Dudley A., et al. *Nat. Photonics*, **10**, 327 (2016).
- Baklund M.P., Arbabi A., Pertov P.N., et al. *Nat. Photonics*, **10**, 459 (2016).
- Drevinskas R., Zhang J., Beresna M., et al. *Appl. Phys. Lett.*, **108**, 221107 (2016).
- D'Ambrosio V., Nagali E., Walborn S.P., et al. *Nat. Commun.*, **3**, 961 (2012).
- Nanni E.A., Huang W.R., Hong K., et al. *Nat. Commun.*, **6**, 8486 (2015).
- Chen J., Wan C., Zhan Q. *Sci. Bull.*, **63**, 54 (2018).
- Wang T., Fu S., Zhang S., et al. *Appl. Phys. B*, **122**, 231 (2016).
- Низьев В.Г., Якунин В.П., Туркин Н.Г. *Квантовая электроника*, **39**, 505 (2009) [*Quantum Electron.*, **39**, 505 (2009)].
- Zhao J., Li B., Zhao H., et al. *Appl. Opt.*, **53**, 3706 (2014).
- Zhu C., Jiao Q., Tan X., et al. *Appl. Opt.*, **58**, 4052 (2019).
- Власенко С.А., Гурин О.В., Дегтярев А.В. и др. *Квантовая электроника*, **43**, 472 (2013) [*Quantum Electron.*, **43**, 472 (2013)].
- Володенко А.В., Гурин О.В., Дегтярев А.В. и др. *Квантовая электроника*, **41**, 853 (2011) [*Quantum Electron.*, **41**, 853 (2011)].
- Володенко А.В., Гурин О.В., Дегтярев А.В. и др. *Квантовая электроника*, **37**, 63 (2007) [*Quantum Electron.*, **37**, 63 (2007)].
- Назаров М.М., Шкуринов А.П., Кулешов Е.А., Тучин В.В. *Квантовая электроника*, **38**, 647 (2008) [*Quantum Electron.*, **38**, 647 (2008)].
- Гайворонский В.Я., Назаров М.М., Сапожников Д.А., Шепелявий Е.В., Шкельнюк С.А., Шкуринов А.П., Шуваев А.В. *Квантовая электроника*, **35**, 407 (2005) [*Quantum Electron.*, **35**, 407 (2005)].
- Chang G., Divin Ch.J., Liu Ch., et al. *Opt. Lett.*, **32**, 433 (2007).
- Winnerl S., Zimmermann B., Peter F., et al. *Opt. Express*, **17**, 1571 (2009).
- Imai R., Kanda N., Higuchi T., et al. *Opt. Express*, **20**, 21896 (2012).
- Xie Z., He J., Wang X., et al. *Opt. Lett.*, **40**, 359 (2015).
- Wakayama T., Higashiguchi T., Sakaue K., et al. *Sci. Rep.*, **8**, 8690 (2018).
- Al Dhaybi A., Degert J., Brasselet E., et al. *J. Opt. Soc. Am. B*, **36**, 12 (2019).
- Xu Y., Zhang H., Li Q. *Nanophotonics*, **9**, 3393 (2020).
- Degtyarev A., Maslov V., Topkov A. *Continuous-wave Terahertz Waveguide Lasers* (LAP LAMBERT Academic Publishing, 2020).
- Legenkiy M., in: *Proc. 17th Int. Conf. «Mathematical Methods in Electromagnetic Theory» (MMET'2018)* (Kyiv, Ukraine, 2018).
- Дегтярёв А.В., Свич В.А., Ткаченко В.М., Топков А.Н. В сб.: *Использование радиоволн миллиметрового и субмиллиметрового диапазонов* (Харьков, ИРЭ АН Украины, 1993, с. 105).
- Marcatily E.A.J., Schmeltzer R.A. *Bell Syst. Tech. J.*, **43**, 1783 (1964).
- Henningesen J., Hammerich M., Olafsson A. *Appl. Phys. B*, **51**, 272 (1990).