

ЭЛЕКТРОНИКА

УДК 681.382:621.395

**ФАЗИРОВАННЫЕ ЛАЗЕРНЫЕ РЕШЕТКИ
В ПАССИВНЫХ ОПТИЧЕСКИХ СЕТЯХ ДОСТУПА**

Я.В. АЛИШЕВ, В.Н. УРЯДОВ, В.М. БРАТАУС, С.А. ЛУКАШЕВИЧ

*Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники
П. Бровка, 6, Минск, 220013, Беларусь**Поступила в редакцию 15 декабря 2004*

Исследованы внешние характеристики фазированных лазерных решеток (ФЛР) с целью использования в центральных узлах пассивной оптической сети доступа в качестве источников мощного когерентного излучения для увеличения числа абонентов сети и достижения максимального расстояния до них.

Ключевые слова: фазированные лазерные решетки, пассивные оптические сети, лазер, оптические разветвители.

Введение

Пассивные оптические сети (Passive Optic Network, PON) обладают многими положительными качествами, приближая оптические выносы вплотную к потребителям, многие из которых (например, в Минске несколько десятков предприятий) не имеют прямого доступа к оптике, но находятся на расстоянии не более 1,5–2 км от волоконно-оптических сетей. Сети PON очень экономичны, особенно если их сравнивать с дорогостоящими сетями SDH или сетями XDSL в случае металлических кабелей. Основные затраты при построении сети приходятся на установку абонентских окончаний, и если траншеи для кабелей все равно должны быть вырыты, то нет никакой разницы между прокладкой оптического или металлического кабеля.

Основная идея архитектуры PON — использование всего одного приемопередающего устройства в центральном узле для передачи широкополосного прямого потока и одного приемопередающего устройства для передачи обратного потока. МСЭ-Т принял стандарты по рекомендациям G.983.1, G.983.3 и G.984.3, соответствующие скоростям 155 Мбит/с, 622 Мбит/с и 2,5 Гбит/с, обеспечивающие транспортные мультисервисные услуги (речь, видео, данные). Применение фазированных лазерных решеток в качестве передающего устройства на центральном узле и квантово-размерных лазеров или РОС-лазеров (полупроводниковых источников излучения) на другом конце позволит создать транспортные сети операторского класса (магистральные мультисервисные) и наиболее экономичные сети.

Ведущую роль в разработке и исследованиях ФЛР играют фирмы: General Electric, McDonnell-Douglas, АТТ, Hughes, Lockheed, Optelecom, Spectra Diode Labs, Laser diode (США), Siemens (ФРГ), Sony, Hitachi (Япония).

В России ведутся лабораторные исследования различных свойств ФЛР в ряде НИИ и вузовских лабораториях. Наиболее важные с точки зрения прогресса направления, исследования выполнены в ФИ им. Лебедева, ИАЭ им. Курчатова, ВНИИ ОФИ, ФТИ им. Иоффе, МИФИ, МВТА.

Вместе с тем об исследованиях внешних характеристик фазированных лазерных решеток, важных для использования в различных приложениях, публикаций нет. Подавляющее число публикаций в журналах мирового уровня (Appl. Phys. Lett, Appl. Optics, Laser Focus World, Квантовая электроника, ЖТФ и др.) являются сообщениями о результатах экспериментальных исследований [1–10]. Теоретические исследования малочисленны, касаются анализа физических характеристик фазированных лазерных решеток и не приводят данных, пригодных для обоснования инженерных расчетов при конкретных применениях.

Наиболее эффективными для создания ФЛР могут быть РОС-лазеры (распределенной обратной связью) и одночастотные квантово-размерные лазеры, толщина слоев которых сравнима с длиной волны де-Бройля для электронов и дырок. Количественное уменьшение размеров вещества приводит к качественному изменению его квантово-механических, а также оптических свойств — увеличивается ширина запрещенной зоны, уменьшается ширина спектра излучения.

В статье сделана попытка восполнить вышеописанный пробел в исследованиях характеристик ФЛР с целью использования их на центральном узле пассивных оптических сетей.

Теоретический анализ

Методы сложения полей (интерференции) с целью увеличения интенсивности поля в дальней зоне ($R \geq L^2/\lambda$), где R — расстояние до точки наблюдения; L — размеры источника; λ — длина волны) достаточно подробно разработаны для антенных решеток радиодиапазона ($\lambda \geq 10^{-3}$ м), где длина когерентности оказывается достаточно большой; это позволяет вести все расчеты (для практических случаев), считая источники излучения приближенно монохроматическими.

Основным свойством фазированных антенных решеток (ФАР) радиодиапазона, обеспечивающим их широкое распространение, является возможность электрического управления излучением без механического перемещения каких-либо элементов антенного устройства. Электрическое управление ФАР позволяет осуществлять гибкое изменение параметров (направление луча, ширины главного лепестка, способа сканирования, подавление помех) с помощью ЭВМ и различных управляющих программ (в том числе и адаптирующихся к изменяющейся обстановке), в значительной степени преодолевая механическую инерцию крупногабаритных антенных систем.

После создания в начале 60-х годов прошедшего столетия источников оптического диапазона (лазеров) появился ряд работ, в которых делаются попытки использования принципов построения работы ФАР радиодиапазона применительно к лазерным источникам инфракрасного и видимого излучения. При этом ставились следующие задачи:

увеличение направленности (сужение главного лепестка) по сравнению с одиночным излучателем;

увеличение мощности излучения в главном лепестке путем объединения нескольких источников;

электрическое сканирование — изменение направления луча по заданному алгоритму.

Отметим, что при решении этих задач для оптического диапазона остается желательным, а в большинстве применений необходимым, создание однолепестковой диаграммы направленности (ДН) с достаточно низким уровнем боковых апертурных и дифракционных лепестков. Способы решения этой задачи в радиодиапазоне известны и разработаны достаточно полно [11, 12].

Однако, как показало развитие теории и техники лазерного приборостроения за последние 20 лет, одновременное решение этих задач в приборах оптического диапазона наталкивается на значительные трудности, связанные с принципами работы и технологией производства лазерных устройств, поэтому идеальное сочетание всех желательных свойств в одном лазерном устройстве оптического диапазона пока не достигнуто, хотя некоторые параметры и удается довести до достаточно высокого уровня. Поэтому в зависимости от назначения прибора используются те или иные компромиссные решения.

В настоящее время фазированные лазерные решетки (ФЛР) разрабатываются в основном для перспективного использования в следующих областях информационных технологий:

волоконно-оптические системы передачи (формирование мощного сигнала оптического диапазона и ввод его в волокно или пучок волокон);

околоземные трассы для передачи сигналов на малые расстояния;
космическая связь (межспутниковая и спутник-Земля);
лазерная локация высокой точности в околоземных и космических условиях.

Использование лазерных решеток для накачки мощных лазеров других типов (например, твердотельных лазеров Nd: АИГ и др.).

Для оценки целесообразности использования ФЛР в различных случаях необходимо в качестве альтернативы иметь в виду лазерный прибор, имеющий близкие к требуемым характеристики, но не обладающий специфическими возможностями решетки излучателей. В качестве такого прибора, удовлетворяющего основным требованиям систем передачи информации, является одиночный лазерный источник излучения, работающий в одномодовом режиме, сопряженный с коллиматором (фокусирующей зеркальной или линзовой системой) и снабженный электромеханическим или электрическим устройством управления для наведения луча, сканирования или изменения каких-либо характеристик (например, ширины луча). Подобные лазерные устройства позволяют получить в оптическом диапазоне $\lambda=10^{-5}-10^{-7}$ однолепестковую ДН с шириной луча порядка угловой секунды, мощностью излучения, определяемой используемым лазером (до величин порядка 10^2 Вт) в непрерывном режиме. К недостаткам подобных систем следует отнести значительные габариты и необходимость ряда вспомогательных систем, которые намного превышают размеры излучателя, низкий КПД, приводящий к существенным энергетическим затратам, и не всегда удовлетворительные возможности сканирования.

Возможности получения удовлетворительных характеристик ФЛР улучшились с появлением полупроводниковых лазеров (ППЛ). Для применения в качестве элементарных излучателей ФЛР имеют ряд преимуществ перед другими типами лазеров:

малые габаритные размеры (особенно поперечные), соизмеримые с длиной волны;
малая потребляемая мощность;
относительно высокий КПД (20–40%);
возможность монолитной интеграции нескольких ППЛ;
конструктивная простота осуществления питания, накачки, управления;
высокое быстродействие;
долговечность (время наработки на отказ порядка 10^5-10^6 ч).

Основные недостатки ППЛ:

сложность технологии изготовления;
значительный разброс параметров по ансамблю, требующий отбора;
малая выходная мощность в единичном приборе;
трудность обеспечения стабильной генерации;
сравнительно широкая ДН.

В качестве материала ППЛ применялось значительное количество полупроводниковых соединений. Наилучшие результаты достигнуты с двумя соединениями $Al_xGa_{1-x}As$ и $InGaAsP$, используемыми в виде двойных гетероструктур и генерирующими инфракрасное излучение при комнатной температуре.

В последние годы происходит быстрое совершенствование ППЛ, однако обычно улучшение одних характеристик происходит за счет ухудшения других. Считается, что для успешного использования в перечисленных областях желательны следующие значения основных характеристик:

одночастотная генерация при 300^0 К в непрерывном и импульсном режимах;
однолепестковая ДН в дальней зоне, ширина которой близка к дифракционному пределу;
мощность излучения – единицы ватт (в непрерывном режиме);
пороговая плотность тока не более 5 А/мм²;
линейная ватт-амперная характеристика (ВАХ);
минимальное уширение спектральной линии при импульсной модуляции;
достаточное быстродействие (время включения порядка пс).

Для систем сложения полей оптического диапазона возникает необходимость оценки ограничений, связанных с частичной когерентностью источников, а также тех отклонений от иде-

ального случая сложения монохроматических полей, которые возникают при создании антенных решеток оптического диапазона.

Предельные параметры регулярной эквидистантной решетки синхронизированных инжекционных лазеров можно получить из известных для радиодиапазона соотношений [11]. Для равномерной решетки из N синфазных элементов главный лепесток нулевого порядка (низшая мода) направлен по нормали к решетке. Ширина главного лепестка (расходимость) $2\theta_{0,5}$ определяется общей волновой длиной решетки [13]:

$$2\theta_{0,5} \approx \lambda / L, \quad (1)$$

где $L=Nd$; d — шаг решетки. При неравномерном амплитудном распределении или фазовых ошибках расходимость может увеличиться в несколько раз. Отметим, что при некогерентном сложении излучения элементов решетки расходимость в плоскости решетки определяется расходимостью одного элемента:

$$2\theta_{0,5} \approx \lambda / a, \quad (2)$$

где a — ширина излучающего пятна.

При когерентном сложении излучения элементов синхронизированной решетки максимальное значение общей мощности излучения P_{Σ} в направлении главного максимума [14]

$$P_{\Sigma} \approx N^2 P_0, \quad (3)$$

где P_0 — мощность излучения одного элемента.

При неравномерном излучении элементов и фазовых ошибках P_{Σ} меньше. При некогерентном сложении излучения N источников максимальная мощность

$$P_{\Sigma} \approx NP_0. \quad (4)$$

Предельное значение суммарной мощности P_{Σ} в соответствии с (3) практически не достигается также вследствие многолепесткового характера ДН ФЛР, связанной с минимальным шагом решетки d , который технологически удается реализовать. Различные технологии, которые используются для изготовления решеток ППЛ имеют разрешающую способность порядка 2–3 мкм. Практически минимальный шаг ФЛР, достигнутый в настоящее время, составляет 4–5 мкм.

Известно, что ДН эквидистантной решетки с линейным фазовым распределением при шаге $d > 0,5\lambda_0$ может иметь (при $d/\lambda_0 > 1$ обязательно имеет) несколько главных максимумов порядков $n=0, \pm 1, \pm 2, \dots$, направления которых определяются выражением [14]

$$\sin \theta_n = n\lambda_0 / d + \sin \theta_0, \quad (5)$$

где θ_0 — направление главного максимума нулевого порядка.

В большинстве случаев дополнительные главные максимумы (ДГМ) являются нежелательными, так как увеличивают потери энергии и информации, а также служат источниками всякого рода помех. В то же время реализация шага решетки $d < 0,5\lambda$ практически невозможна. Для снижения уровня ДГМ высших порядков используется ряд способов, некоторые из которых достаточно эффективны в оптическом диапазоне волн [11].

Рассмотрим линейные синфазные неэквидистантные решетки (НЭР) двух видов (рис. 1). Для равномерно возбужденной несимметричной решетки (рис. 1) множитель системы $f_c(\theta)$ может быть представлен в виде:

$$f_c(\theta) = \sum_{n=1}^N e^{-jk_0 r_n},$$

где $k_0 = 2\pi/\lambda$; $r_n = r_1 - x_n \sin \theta$; $x_n = \sum_{i=1}^n d_i$,

шаг решетки d_i может изменяться по различным законам.

Примем $d_i = d_1 + (i-1)\Delta$, т.е. по закону арифметической прогрессии. Тогда результирующая интенсивность несимметричной НЭР получается в виде:

$$I(\theta) \approx I_1(\theta) \left[\left(1 + \sum_{n=1}^{N-1} \cos(\psi_n) \right)^2 + \left(\sum_{n=1}^{N-1} \sin(\psi_n) \right)^2 \right]$$

где $\psi_n = k_0 x_n$; $x_n = n(d_1 + ((n-1)/2))$

Для равномерно возбужденной симметричной НЭР (рис. 1), у которой

$$d_{i+1} = d_1 + i\Delta, \quad x_n = d_1 + 2 \sum_{i=1}^{n-1} d_{i+1} = (2n-1)d_1 + n(n-1)\Delta,$$

находим:

$$I(\theta) \approx 4I_1(\theta) \left[\sum_{n=1}^{N/2} \cos\left(\frac{\psi_n}{2}\right) \right]^2. \quad (6)$$

Для упрощения анализа примем $\alpha=0$ ($\alpha = \Delta\lambda/\lambda$ — относительная ширина линии излучения), что при $\alpha \ll 1$ вполне допустимо. Поскольку выполнение решетки оптического диапазона с шагом $d < 0,5\lambda$ вызывает большие трудности и не всегда возможно, для снижения уровня ДГМ высших порядков может быть использован ряд способов, допускающих относительно большие межэлементные расстояния.

Результирующая ДН эквидистантной решетки идентичных излучателей определяется формулой перемножения ДН [14]:

$$F(\theta) = F_1(\theta) F_c(\theta), \quad (7)$$

где $F_1(\theta)$ — ДН одного излучателя; $F_c(\theta)$ — ДН решетки из ненаправленных излучателей.

Уровни дополнительных главных максимумов зависят от типа решетки (симметричная или несимметричная), приращения шага Δ/d_1 и числа излучателей N , поэтому при заданной величине N параметры НЭР должны быть оптимизированы. На рис. 2 приведены нормированные ДН эквидистантных решеток, рассчитанные по формуле (6), и оптимизированных несимметричных НЭР, позволяющих получить минимальный при данном числе N уровень (± 1)-х дополнительных лепестков (рис. 2, в, г).

Из выражения (5) можно получить условие отсутствия дополнительных главных лепестков даже в случае ненаправленных излучателей.

Полагая в (5) $n=-1$, находим, что для этого шаг решетки не должен превышать величины

$$\left(d/\lambda_0 \right)_{\max} = (1 + \sin \theta_0)^{-1}. \quad (8)$$

Очевидно, что при $0 < \theta_0 < (\pi/2)$, $1,0 \geq (d/\lambda_0)_{\max} \geq 0,5$.

Однако это требование может быть значительно ослаблено для направленных (особенно остронаправленных) излучателей решетки (зеркальных, линзовых и т.п. излучателей — коллиматоров). При таких излучателях лепестки высших порядков ("решеточные" лепестки) значительно ослабляются диаграммой направленности излучателя $F_1(\theta)$. Обычно достаточно подавления "решеточных" лепестков F_n до уровня апертурных боковых лепестков решетки r_a , определяемых амплитудным и фазовым распределением возбуждения излучателей.

Найдем допустимую величину шага d синфазной линейной решетки, составленной из идентичных линейных излучателей длиной L ($L \leq d, d, L \ll \lambda_0$) с гауссовым амплитудным распределением (рис. 3)

$$A(x) = A_0 \exp(-x^2/\beta^2), \quad (9)$$

Найдем допустимую величину шага d синфазной линейной решетки, составленной из идентичных линейных излучателей длиной L ($L \leq d, d, L \ll \lambda_0$) с гауссовым амплитудным распределением (рис. 3) $A(x) = A_0 \exp(-x^2/\beta^2)$, где параметр β соответствует уменьшению амплитуды в e раз при $x = \beta$. ДН такого излучателя при аналитическом продолжении до $+\infty$

$$f_1(\theta) \cong \int_{-\infty}^{\infty} A(x) \exp(jk_0 x \sin \theta) dx.$$

После нормировки получается в виде

$$F_1[\theta] \approx \exp\left[-\left(\frac{1}{2} k_0 \beta \sin \theta\right)^2\right].$$

Поскольку для синфазной решетки направления ближайших (± 1) -х лепестков определяются выражением

$$|\theta| = \arcsin(\lambda_0 / d),$$

то их максимальный уровень (для излучателя с высокой степенью когерентности $\gamma_{1n} \approx 1$):

$$F_{\pm 1}(\theta) \approx \exp\left[-(\pi\beta/d)^2\right].$$

Считая достаточным подавление (± 1) -х лепестков до уровня $F_{\pm 1} < r_\alpha$, получаем, что допустимый шаг решетки

$$d_{\max} = \frac{9,25\beta}{\sqrt{r_\alpha} [\text{äÄ}]}.$$

При гауссовом амплитудном распределении можно положить $L \approx 2\beta$, т.е. что интенсивность поля уменьшается на краях излучателя в e^2 раз. Тогда допустимая величина шага

$$\left(\frac{d}{L}\right)_{\max} = \frac{4,6}{\sqrt{r_\alpha} [\text{äÄ}]},$$

а минимальный относительный уровень напряженности возбуждающего поля посередине между соседними излучателями

$$a_{\min} = \exp\left(\frac{21,4}{r_a}, \text{äÄ}\right).$$

Зависимости $(d/L)_{\max} = f_1(r_a, \text{äÄ})$ и $a_{\min} = f_2(r_a, \text{äÄ})$ представлены на рис. 4. Очевидно, что уровень подавления "решеточных" лепестков определяется отношением d/L (а не d/λ_0). При плотном расположении излучателей $d/L=1$ достигается уровень $F_{\pm 1} = -21$ дБ ($a_{\min}=0,36$). Дальнейшее снижение уровня дополнительных лепестков при данном амплитудном распределении ограничивается условиями размещения излучателей и ростом взаимных связей между ними.

Очевидно, что при $d/\lambda_0 \gg 1$ значения $d/L \sim 1$ могут быть достигнуты только увеличением излучающей апертуры элемента решетки (например, с помощью микролинз, в фокусе которых помещены полупроводниковые лазеры).

Заключение

Наиболее распространенными в настоящее время являются ФЛР, полученные на основе низкопороговых AlGaAs-гетероструктур методом жидкостной или газофазной эпитаксии из металлорганики. При ширине полосок 3 мкм и шаге 10 мкм в 10-элементных линейках получено когерентное сложение полей, расходимость близка к дифракционной, мощность излучения в непрерывном режиме до 600 мВт, в импульсном режиме (длительность импульсов накачки 150 мкс) — до 1 Вт при КПД 36% (в больших линейках — до 2,6 Вт). Ресурс при мощности 100 мВт достигает $31 \cdot 10^3$ ч, при большей мощности ресурс уменьшается в несколько раз. Конструктивные реализации ФЛР направлены на достижение тех или иных преимуществ перед одиночными ППЛ. Поскольку некогерентное сложение мощностей ППЛ не приводит к каким-либо новым качественным показателям, в дальнейшем рассматриваются только ФЛР со сложением полей, близким к когерентному. В настоящее время такие ФЛР обладают следующими параметрами и возможностями:

объединение в одной линейке нескольких десятков ППЛ (10–40) позволяет получить общую мощность излучения 2,0–2,7 Вт в непрерывном режиме при расходимости 2–5°;

спектр излучения ФЛР близок к одномодовому, ширина линии излучения ФЛР ($\Delta\lambda$) составляет 0,1–10 А (при длине волны $\lambda \approx 850$ нм);

ВАХ близка к линейной вследствие практического отсутствия в ППЛ поперечных мод при узких полосках и стабилизирующего действия фазировки;

пороговая плотность тока накачки значительно меньше, чем у отдельных элементов (до 5 А/мм²);

ФЛР допускает индивидуальное управление амплитудой и фазой излучения элементов, что позволяет осуществлять изменение направления луча и генерирование сверхкоротких световых импульсов (до 20 пс).

В соответствии с теорией разреженных решеток средний уровень боковых лепестков ДН по мощности, который может быть достигнут, имеет порядок $1/N$. Таким образом, чтобы получить уровень (± 1)-х максимумов порядка –20 дБ необходимо иметь $N \geq 10^2$.

PHASED LASER ARRAYS IN PASSIVE OPTICAL NETWORK

YA. ALISHEV, V. URYADOV, V. BRATAUS, S. LUCASHEVICH

Abstract

The phased laser arrays as the high power coherent emission source for passive optical network central nodes is analysed. It is described how to use its output performances for more both the user nodes and the distance between the lasts.

Литература

1. *Голдобин И.С. и др.* // Квантовая электроника. 1989. № 10. С. 1957–1994.
2. *Карпов С.Ю.* // Письма в ЖТФ. 1991. № 7. С. 31–34.
3. *Качурин О.Р. и др.* // Квантовая электроника. 1991. №7. С. 31–34.
4. *Bour D. et al.* // Appl. Phys Lett. 1989. № 26. С. 2637–2638.
5. *Sakatamoto M. et al.* // Appl. Phys Lett. 1989. № 23. С. 2299–2300.
6. *Базаров А.Е. и др.* // Квантовая электроника. 1987. № 14. С. 874–876.
7. Пат. США. H01S 3/19, №4594719. Phase-locked laser array having a nonuniform spacing between lasing regions.
8. Пат. США. H01S 3/098, №4677629. Means for phase locking the outputs of a surface emitting laser diode array.
9. Пат. США. H 01 s 3/00, № 4686485. Optical injection locking of laser diode arrays. *Goldberg L. et al.*
10. *Forrest G.T.* // Laser Focus/Elec.-Opt. 1988. № 24. P. 8.
11. *Шифрин Я.С.* // Сов. радио. 1970. С. 384.
12. *Вендик И.Б.* // Зарубежная радиоэлектроника. 1990. № 11. С. 86–93.
13. *Алишев Я.В., Юрьев В.Ф., Ямайкин В.Е.* // Электромагнитные волны. 1996. № 1. С. 94–97.
14. *Алишев Я.В.* Многоканальные системы передачи оптического диапазона. М., 1986. 238 с.