

ИНФОРМАЦИОННО-ИЗМЕРИТЕЛЬНЫЕ ПРОЦЕДУРЫ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ СВЕРХИЗЛУЧЕНИЯ НАНОЛАЗЕРОВ

Мачехин Ю.П., Курской Ю.С., Гнатенко А.С.

Харьковский национальный университет радиоэлектроники, 61166, пр. Науки, 14.

тел. (057) 702-14-84, факс (057) 702-11-13

E-mail: yuri.machekhin@gmail.com

The article presents the brief review of the principles of construction and functioning of nanolasers. Today development of nanolasers is far from completion. As nanolasers are a new type of lasers comparatively, the mechanisms of they work are not set completely. In the article it's examined the case of generation in nanolasers on the basis of the superfluorescence effect.

Введение

Разработка оптических нанообъектов, и в первую очередь, нанолазеров представляет одно из направлений развития элементной базы оптоэлектроники. К настоящему времени, созданы такие конструкции нанолазеров, например, спазеры, (spaser: surface plasmon amplification by stimulated emission of radiation), в которых использовались локальные процессы возбуждения плазмонных колебаний на поверхности металлических наночастиц. Однако, окончательные разработки почти всех конструкций нанолазеров далеки от завершения, пока не будут установлены условия формирования спектральных и частотных характеристик излучения нанолазеров. Также нет полного понимания условий импульсного и непрерывного излучения нанолазеров.

Существующие конструкции нанолазеров можно разделить на несколько групп, в которых используются различные механизмы накачки активной среды. Добротность резонатора у спазеров невелика (где-то 20-40) и существенно отличается от добротности резонатора обычного лазера, которая составляет величину порядка 10^5 . Другая конструкция основана на микродисковом резонаторе, в котором возбуждаются моды шепчущей галереи, а активная среда заполняет внутреннее пространство микродиска. Третья конструкция предусматривает применение линейных полупроводниковых активных сред, в которых частота генерируемого излучения определяется спектральными свойствами жидкой активной среды. Конечно, в каждой из этих конструкций реализуется свой механизм генерации излучения.

На возможность существования сверхизлучения впервые обратил внимание Р. Дике [1] в 1954 году. А в 1973 году сверхизлучение было обнаружено в эксперименте. В основе явления сверхизлучения лежат процессы корреляции между фазами излучения отдельных атомов. Эффект сверхизлучения Дикенаблюдается в условиях малого расстояния между излучающими центрами по сравнению с длиной волны излучения и проявляется в возникновении всплесков когерентного излучения [2]. Интерес к этому явлению связан с появлением когерентного излучения у нанолазеров, обусловленного эффектом сверхизлучения в активной полупроводниковой среде [3]. ависимость параметров спектраизлучения от плотности тока накачки и от температуры позволяют оценить в несколько десятков фемтосекунд характерное время коллективного взаимодействия носителей заряда [3].

В конце 90-х годов исследователи обратили внимание на особенность сверхизлучения в полупроводниковых гетероструктурах, предполагая, что концентрация неравновесных носителей заряда в активной области полупроводникового лазера может флуктуировать вокруг среднего значения. Наличие нефлуктуирующего среднего уровня концентрации носителей может приводить к образованию доменов с повышенной концентрацией неравновесных носителей.

Изученные механизмы формирования сверхизлучения в полупроводниковых гетероструктурах [3] и наногетероструктурах с квантовыми точками [4], как показано в отмеченных работах, сформированные домены имеют размеры много меньшие длины волны излучения. В свою очередь, нанолазеры, в основе которых используются

полупроводниковые материалы с гетероструктурами и квантовыми точками, могут представлять собой основу источников импульсного сверхизлучения.

Активная зона лазера представляет собой пространственную последовательность доменов, в которых все излучающие атомы или молекулы сфазированы и обеспечивают синхронное излучение всех одиночных излучателей, входящих в состав каждого домена. Еще одно условие, которое обеспечивает генерацию сверхизлучения, основано на распределенной обратной связи в нанолазере, которая обусловлена малым коэффициентом обратного отражения $R \ll 1$ в активной среде.

Особенности генерации импульсного сверхизлучения в нанолазере

Работы по изучению сверхизлучения в полупроводниковых гетероструктурах проводились в двухтысячных годах группой российских ученых [2, 3]. Было показано [3], что сверхизлучение может формироваться в наногетероструктурах с квантовыми точками, каждая из которых обеспечивает реализацию изолированного домена. Процесс формирования импульса сверхизлучения обусловлен спонтанно синхронизированными фазами отдельных излучающих диполей, входящими в состав домена. Начальный этап нарастания мощности излучения определяется постоянной величиной инкремента. Мощность излучения нанолазера возрастает по экспоненциальному закону

$$P = P_0 \exp(\gamma t),$$

где инкремент γ зависит от разности населенности уровней 1 и 2, т.е.

$$\gamma = \nu(N_1 - N_2)/N_2.$$

Здесь ν – нормировочный коэффициент, с размерностью $1/c$. В зависимости от текущего момента времени можно установить характерные точки в процессе временного изменения мощности излучения. В начальный момент времени $t=0$ мощность излучения равна P_0 – уровень спонтанного излучения. Дальнейший процесс развития мощности излучения определяется временной зависимостью N_1 на фоне временной экспоненциальной зависимости. По мере увеличения мощности излучения иссякает населенность уровня 1 и процесс нарастания замедляется, в результате чего, стабилизируется уровень мощности излучения в определенный момент времени, который характеризует максимальный уровень импульсного излучения. При большой разнице населенностей рабочих уровней, наступает экспоненциальный рост мощности излучения.

Проведенный анализ условий формирования сверхизлучения Дике в доменной структуре был основан на теоретической модели описания концентрации неравновесных носителей (электронов и дырок) в активной области лазера. С повышенной концентрацией неравновесных носителей формируется устойчивые структуры доменов. С ростом концентрации неравновесных носителей заряд при достижении некоторого критического значения (n_0) система разбивается на домены, и тем самым происходит неравновесный фазовый переход второго рода. Домены представляют собой устойчивые образования, каждый из которых представляет собой область квантовой ямы, в которой излучение локализовано. Каждый домен представляет более плотную оптическую среду. Можно предполагать, что в пределах одного домена возникает эффект типа «распределенная обратная связь», приводящий к тому, что домен излучает когерентно (все излучатели внутри домена находятся в одной фазе), как единое целое. Именно спонтанная фазировка излучающих носителей, без внешнего когерентного воздействия на систему, является отличительной чертой «сверхизлучения Дике» [7].

В качестве альтернативы вертикально-излучающим лазерам [10], квантово-каскадным лазерам [11] и лазерам с микродисковыми резонаторами [12], в некоторых случаях подготовлены условия для использования нанолазеров. Мощность приведенных лазеров соизмерима, но спектральные и частотные параметры могут существенно отличаться. Поскольку нанолазеры обладают минимальными размерами, которые позволяют их отнести к лазерам последнего поколения, их использование предпочтительно в информационных и измерительных системах, работающих в непрерывном или импульсном режимах. Поэтому, применение нанолазеров может

позитивно влиять на временной режим работы информационных систем. Тем не менее, разработок нанолазеров на уровне промышленных образцов еще не существует, поэтому основная текущая цель заключается в разработке конструктивных и технологических задач для освоения серийного использования нанолазеров, не только в информационных сетях, а также в современных измерительных и сенсорных устройствах.

Особенности излучения нанолазеров, обеспечивающие измерительные процедуры

Развитие измерительной лазерной техники основано на прецизионных параметрах лазерного излучения, а именно, стабильность частоты, как правило, долговременная стабильность, позволяющая посредством частотных или временных измерений определять параметры физических величин. Аналогичные требования к пространственным параметрам излучения должны выполняться в пределах обеспечивающих требуемую точность измерений.

Особенность информационных параметров у нанолазеров заключается в характеристиках конструкции резонатора и активной среды нанолазеров. В кольцевых нанолазерах с плазмонной накачкой активной среды, условия стабильности частоты не установлены, поэтому на примере таких нанолазеров необходимо установить условия стабилизации частоты излучения. С другой стороны параметры пучка излучения у нанолазера также не определены, поэтому необходимо установить условия, в соответствии с которыми можно реализовать стабильную диаграмму направленности излучения. В настоящей работе поставлена цель установить условия стабилизации частоты по естественному частотному реперу.

Применение нанолазеров представляет собой отдаленную, но все таки перспективу. Чтобы понять, как эта перспектива может быть реализована необходимо понять, как осуществлять стабилизацию частоты, или длины волны, излучения нанолазера. В работе [13] приведена оценка полуширины линии излучения нанолазера 0,05 – 0,07 нм, которая была зафиксирована с помощью монохроматора FHR 1000 и многоканального охлаждаемого фотодетектора с разрешением 0,05 нм [13], хотя приведенная оценка ширины линии излучения ограничена спектральным разрешением используемого прибора и не является окончательной величиной. Такая ситуация вполне возможна в тех случаях, когда в качестве измерительного прибора используется дифракционный монохроматор, а не гетеродинный способ измерения линии излучения. Поэтому необходим гетеродинный метод измерения ширины линии излучения нанолазеров с учетом расходимости лазерного излучения. Классическая задача измерения ширины линии излучения применительно к нанолазерам представляет собой самостоятельную инженерную задачу, которая должна быть решена в условиях наноразмерных конструкциях. Второй параметр излучения который играет существенную роль в системах связи и информационно-измерительных системах, является длительность импульсного излучения. Этот параметр сравним по своей величине с длительностью ультракороткого импульса фемтосекундного лазера и, поэтому, для его измерения следует использовать автокорреляционный метод анализа длительности ультракоротких оптических импульсов, разработанный для измерения ультракоротких импульсов излучения фемтосекундных лазеров.

Заключение

В настоящей статье обсуждалась сравнительно новая для оптоинформатики тема – это разработка и использование нанолазеров и устройств на их основе для решения задач передачи высокоскоростных оптических информационных сигналов. Нанолазеры могут работать как в непрерывном так и в импульсном режимах. Для передачи информации предпочтительным является импульсный режим нанолазеров. В этой связи рассмотрены теоретические условия возникновения импульсного лазерного излучения. Поскольку длительность импульсов может регулироваться электронным способом в пределах от единиц пикосекунд до сотен фемтосекунд, то импульсные нанолазеры могут применяться в передающих системах оптоинформатики. Следуя приведенным в статье выводам по работе нанолазеров, кроме информационных каналов лазеры можно использовать в

измерительных комплексах, которые обеспечивают прецизионную точность измерений. Учитывая, что в результате создания различных конструкций нанолазеров за последние 10-15 лет не была создана общая теория нанорезонаторов, что является сдерживающим фактором в развитии этого типа лазеров. Малые размеры нанолазеров не позволяют использовать классические конструкции резонаторов, в состав которых входят управляемые по положению в пространстве зеркала. По этой причине управление частотой излучения нанолазеров может быть реализовано с использованием механизмов, основанных, возможно, на биомолекулярных механизмах. Следует учесть, что в настоящее время ведутся активно работы по созданию молекулярных наноустройств, в том числе и тех, которые позволяют перемещать наноэлементы. Конечно, это не простая задача, которую сейчас не ясно как решить. Одновременно с решением этой поставленной задачи, необходимо решить иную, измерительную задачу. Она связана с измерением длительности ультракоротких импульсов, которые возникают в нанолазерах в результате эффекта сверхизлучения. С помощью автокорреляторов следует измерять длительность ультракоротких импульсов

Если сформулировать задачи, решение которых необходимы для измерения параметров излучения нанолазеров, то будет сформулирован целый класс задач, необходимых для нанометрологии. ширины линии и воспроизводимости частоты излучения.

Список литературы:

1. R.H. Dicke, Phys. Rev., 93, 99, (1954).
2. Л.Я. Карачевский, И.И. Новиков, Н.Ю. Гордеев, Механизм сверхизлучения. Дике в полупроводниковых гетероструктурах, Физика и техника полупроводников, том 38, вып.7, 872-876, 2004.
3. Л.Я. Карачевский, И.И. Новиков, П.С. Копьев, D.L. Huffaker, ФТП, том 33, 1456, 1999.
4. Д.В. Лебедев, А.М. Минтаиров и др., Лазерная генерация в микродисках с активной областью на основе решеточно-согласованных InP/AlInAs наноструктур, ЖТФ, 2017, том 87, вып., стр 1066-1071.
5. Ankun Yang, Thangs B. Hoang, T.W. Odomatall, Real-time tunable lasings from plasmonics nanopavity arrays, Naturecommunications, 2015, №4, pp 1-7.
6. В.В. Железняков, Что такое сверхизлучение. Соросовский образовательный журнал, №3, 1997, стр. 52- 57.
7. Л. Аллен, Дж. Эберли. Оптические резонансные двухуровневые атомы, М., Мир, 1978. Л. Аллен.
8. G.G. Zegrya. In: Antimonite Related Strained Layer Heterostructures, ed by M.O. Manasrech (Gordon and Breach, Neward, 1997).
9. А.А. Зябловский, А.В. Дорофеевко, А.П. Виноградов, Двумерный сверхизлучающий плазмонный лазер, стр. 14-15, Труды 55-й научной конференции МФТИ, 2012.
10. H. Li, L. Hui, W. Philip, at all, Vertical-cavity surface-emittine for optical interconnects, SPIE Newsroom (2014).
11. A.H. Chin, S. Vaddiraju at all, Near-infrared semiconductor subwavelength-wire laser, APP. Phys. Lett. 88, 163115 (2006).
12. J.V. Campenhout, P.Rojo Romeo at all, Electriclsly pumped InP-based microdisk laser integrated with a nanophotonic silicon on insulator waveguide circuit, Opt. Express, 15, 6744-6749 (2007).
13. А.Е. Жуков, Н.В. Крыжановская, М.В. Максимов и др. Лазерная генерация в микродисках сверхмалого диаметра, Физика и техника полупроводников, том 48, вып.12, с. 1666-1670, 2014.