

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

Харьковский национальный университет радиоэлектроники

14, пр. Науки, Харьков, 61166, Украина

E-mail: oleksandr.hnatenko@nure.ua

СВЕРХИЗЛУЧЕНИЕ НАНОЛАЗЕРОВ В ИНФОРМАЦИОННО-ИЗМЕРИТЕЛЬНЫХ ПРОЦЕДУРАХ

Предмет и цель работы. Предметом исследований является сверхизлучение нанолазеров и процесс его формирования квантовыми точками, повышенной концентрацией неравновесных носителей заряда, а также физические принципы работы нанолазеров со сверхизлучением в телекоммуникационных системах. Целью работы является обоснование возможности использования нанолазеров в режиме сверхизлучения и устройств на их основе для решения задач передачи высокоскоростных оптических информационных сигналов и задач стабилизации частоты излучения.

Методы и методология работы. Выполнен обзор нескольких типов нанолазеров. Отмечено, что несмотря на создание ряда конструкций, не разработана общая теория стабилизации параметров излучения нанолазеров, что является сдерживающим фактором развития этого типа лазеров и их практического применения. Для использования нанолазеров в информационно-измерительных процедурах должны быть решены задачи стабилизации частоты излучения, получения импульсов заданной длительности (фемтосекундного порядка) и пиковой мощности. Для обеспечения импульсного излучения с необходимыми параметрами авторы предлагают использовать режим сверхизлучения, ранее обнаруженный в полупроводниковых гетероструктурах и выраженный в резком росте мощности излучения. Проведенный анализ условий формирования сверхизлучения в доменной структуре полупроводников основан на теоретической модели описания концентрации неравновесных носителей (электронов и дырок) в активной области лазера.

Результаты работы. Рассмотрен процесс возникновения сверхизлучения в нанолазерах и возможность использования этого эффекта. Доказано, что в режиме сверхизлучения в нанолазерах формируются фемтосекундные импульсы высокой пиковой мощности.

Заключение. Результаты проведенных исследований обосновывают возможность и перспективу использования нанолазеров в режиме сверхизлучения и устройств на их основе для передачи высокоскоростных оптических информационных сигналов, создания новых оптических стандартов частоты и устройств фотоники. Их применение будет способствовать развитию нанометрологии, нанотехники, информационных и иных технологий. Выполнены расчеты, доказывающие, что в режиме сверхизлучения нанолазеры формируют фемтосекундные импульсы мощностью 10,9 мкВт, что позволяет передавать сигнал по волокну на дистанцию 750 м. В дальнейшем планируются работы по увеличению мощности таких лазеров для передачи информации на более длинные дистанции. Библиогр.: 24 назв.

Ключевые слова: нанолазер, сверхизлучение, стабилизация частоты, фотоника, генерация излучения.

Разработка оптических нанообъектов, и в первую очередь нанолазеров, представляет собой одно из перспективных направлений развития фотоники и лазерных технологий. В нанолазерах, или спазерах (от англ. *Surface Plasmon Amplification by Stimulated Emission of Radiation*), используются локальные процессы возбуждения плазмонных колебаний (плазмонов) на поверхности металлических наночастиц [1].

Существующие конструкции нанолазеров можно разделить на несколько групп, в которых используются различные механизмы накачки активной среды. Первые публикации о создании лазеров наноразмеров датируются 2007 годом (М. Хилл, Технический универ-

ситет Эйнховена, Нидерланды). В статье [2] был описан первый металло-полупроводниковый нанолазер с импульсным режимом излучения. Благодаря своей колоннообразной конструкции лазер Хилла получил название *goldfinger*.

В 2011 году С. Динг с коллегами предложили нанолазер, работающий в постоянном режиме излучения при комнатной температуре [3]. Лазер имел размеры $0,34 \times 3,0 \times 1,53$ мкм, электрическую накачку, длину волны излучения $\lambda = 1\,554$ нм, ширину линии излучения 4 нм, добротность $Q \sim 400$ и большие энергетические потери. В 2012 году авторам удалось уменьшить потери за счет увеличения толщины оболочки из нитрита кремния

до 30 нм [4]. Новый лазер имел размеры $1,15 \times 1,39 \times 1,7$ мкм и ширину линии излучения 0,54 нм.

В работе М. Хаявихан [5] представлен коаксиальный нанолазер с оптической накачкой. Группа под руководством С. Феймана (Университет штата Калифорния в Сан-Диего) разработала две конструкции: 1) с диаметром ядра и толщиной оболочки 100 нм; 2) с диаметром ядра 175 нм и толщиной оболочки 75 нм. Есть публикации о создании и более «компактных» нанолазеров с толщиной оболочки 22 нм [6].

Известны конструкции, основанные на микродисковом резонаторе, в котором возбуждаются моды шепчущей галереи, а активная среда заполняет внутреннее пространство микродиска. Еще одна конструкция предусматривает применение линейных полупроводниковых активных сред, в которых частота генерируемого излучения определяется спектральными свойствами жидкой активной среды. Конечно, в каждом из этих вариантов реализуется свой механизм генерации излучения.

Однако конструкции почти всех нанолазеров далеки от завершения по ряду причин. Добротность резонатора Q у спазеров невелика: $Q \sim 15$ – для устройств, которые обеспечивают локализацию моды в трех измерениях, $Q \sim 120$ – при двумерной локализации [7, 8]. При этом добротность резонатора обычного лазера составляет величину порядка 10^5 [9]. Также на сегодняшний день не установлены условия формирования спектральных и частотных характеристик излучения нанолазеров, нет полного понимания условий их импульсного и непрерывного излучения.

Нанолазеры являются перспективным направлением нанофотоники. Решается вопрос применения нанолазеров в качестве инструментов медицинского назначения, приборов измерения времени и в качестве новых оптических стандартов частоты. Нанолазеры могут быть использованы для создания элементов квантового компьютера. Основным фактором, тормозящим их широкое практическое использование, является нерешенный вопрос стабилизации и управления параметрами излучения (монохроматичностью, коге-

рентностью, необходимой мощностью, длительностью импульса, фокусировкой пучка), а также вопросы совместной работы ансамбля нанолазеров, борьбы с шумами и др. Одним из путей решения этих задач является использование режима сверхизлучения (СИ).

Целью работы является обоснование возможности использования нанолазеров в режиме СИ и устройств на их основе для решения задач передачи высокоскоростных оптических информационных сигналов.

1. Формирование СИ. На возможность существования СИ впервые обратил внимание Р. Дике в 1954 году [10], а в 1973 году оно было обнаружено экспериментально. В основе явления лежат процессы корреляции между фазами излучения отдельных атомов. Эффект СИ Дике наблюдается в условиях малого расстояния между излучающими центрами по сравнению с длиной волны излучения и проявляется в возникновении всплесков когерентного излучения [11]. В полупроводниковых нанолазерах когерентное излучение обусловлено эффектом СИ в активной полупроводниковой среде. Зависимость параметров спектра излучения от плотности тока накачки и от температуры позволяет оценить характерное время коллективного взаимодействия носителей заряда, которое составляет несколько десятков фемтосекунд [12].

В конце 1990-х годов исследователи обратили внимание на особенность СИ в полупроводниковых гетероструктурах, предполагая, что концентрация неравновесных носителей заряда в активной области полупроводникового лазера может флуктуировать вокруг среднего значения [11, 12]. Наличие нефлуктуирующего среднего уровня концентрации носителей может приводить к образованию доменов с повышенной концентрацией неравновесных носителей.

Изучение механизмов формирования СИ в полупроводниковых гетероструктурах [12] и наногетероструктурах с квантовыми точками [13] показало, что сформированные домены имеют размеры, много меньшие длины волны излучения. Поэтому нанолазеры, в которых используются полупроводниковые материалы с гетероструктурами и квантовыми точками, представляют собой основу источников импульсного СИ.

Активная зона нанолазера 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 СИ, основано на распределенной обратной связи в нанолазере, которая обусловлена малым коэффициентом обратного отражения $R \ll 1$ в активной среде.

2. Генерация импульсного СИ в нанолазерах. Как было показано в [11], СИ может формироваться в наногетероструктурах с квантовыми точками, каждая из которых представляет собой изолированный домен. Процесс формирования импульса СИ 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:

$$P = P_0 \exp(yt), \quad (1)$$

где P_0 – мощность излучения в начальный момент времени; y – инкремент, зависящий от разности населенности уровней N_1 и N_2 , т. е.:

$$y = \nu \frac{N_1 - N_2}{N_2}, \quad (2)$$

где ν – нормировочный коэффициент с размерностью s^{-1} .

Из соотношений (1) и (2) при начальном моменте времени $t = 0$ следует, что мощность излучения равна P_0 – уровню спонтанного излучения. Дальнейшее увеличение мощности излучения определяется временной зависимостью N_1 . По мере увеличения мощности излучения уменьшается населенность энергетического уровня 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 СИ в доменной структуре был основан на теоретической модели описания концентрации неравновесных носителей (электронов и дырок) в активной области лазера. С ростом концентрации неравновесных носителей заряда при достижении некоторого критического значения (n_0) система разбивается на домены. Таким образом, происходит неравновесный фазовый переход второго рода. Домены представляют собой устойчивые образования, каждое из которых является областью квантовой ямы, в которой локализовано излучение. 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 такая спонтанная фазировка излучающих носителей, без внешнего когерентного воздействия на систему, является отличительной чертой СИ Дике [16].

В качестве альтернативы вертикально-излучающим [19], квантово-каскадным [20], лазерам с микродисковыми резонаторами [21] и волоконным лазерам [22], применяемым сегодня в информационных и измерительных системах, могут быть использованы нанолазеры, работающие в непрерывном или импульсном режимах. Мощность приведенных лазеров соизмерима, но спектральные и частотные параметры могут существенно отличаться. Применение нанолазеров может позитивно влиять на временной режим работы информационных систем. Однако разработок нанолазеров на уровне промышленных образцов еще не существует. Поэтому актуальной остается задача серийного использования нанолазеров не только в информационных сетях, но также в современных измерительных и сенсорных устройствах. Достижение режимов СИ нанолазеров рассматривается как одно из условий их практического использования.

3. Особенности излучения нанолазеров, обеспечивающие информационно-измерительные процедуры. Развитие измерительной лазерной техники основано на прецизионных свойствах лазерного излучения, к

числу которых относится стабильность частоты, позволяющая посредством частотных или временных измерений определять параметры физических величин. Аналогичные требования к пространственным параметрам излучения должны выполняться в пределах, обеспечивающих требуемую точность измерений. Важным условием является получение и стабилизация необходимого значения мощности нанолазера. Энергии импульса должно хватить для прохождения дистанции по оптоволокну прибора и регистрации фотодетектором.

Особенность информационных параметров нанолазеров заключается в характеристиках конструкции резонатора и активной среды. В кольцевых нанолазерах с плазменной накачкой активной среды не установлены условия стабильности частоты и не определены параметры пучка излучения. Поэтому на примере таких нанолазеров необходимо установить условия стабилизации частоты (или длины волны) излучения и реализации стабильной диаграммы направленности излучения.

В работе [23] указана 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 [23], хотя приведенная оценка ширины линии излучения ограничена спектральным разрешением используемого прибора и не является окончательной величиной.

Такая ситуация вполне возможна в тех случаях, когда для измерения линии излучения используется дифракционный монохроматор, а не гетеродин. 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 конструкций.

Существенную роль в системах связи и информационно-измерительных системах играет 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. В работах [5, 6] были проведены оценки импульсов в режиме СИ и показано, что максимальная граница длительности составляет 400 фс. Таким образом, режим СИ нанолазеров позволяет получить импульсы фемтосекундной длительности.

В качестве третьего параметра излучения нанолазеров, важного для обеспечения информационно-измерительных процедур, следует рассмотреть мощность излучения.

Выполним расчеты максимальной дистанции распространения по оптоволокну импульсов нанолазера, генерируемых в обычном режиме и режиме СИ. Отметим, что в оптоволоконных измерительных приборах, таких как интерферометры или гироскопы, применяется одномодовое волокно с сохранением поляризации. Коэффициент потерь α [дБ/км] в волокне зависит от длины волокна L , мощности входного сигнала P_1 и определяет мощность сигнала на выходе P_0 [24]:

$$\alpha = \frac{10}{L} \lg \frac{P_1}{P_0}. \quad (3)$$

При проектировании оптических измерительных и информационных систем связи важной характеристикой фотоприемного устройства является минимальная (пороговая) регистрируемая мощность оптического сигнала $P_{\min}$. Если в выражении (3) в качестве P_0 представить минимальную регистрируемую (пороговую) мощность оптического сигнала $P_{\min}$, то можно получить выражение дальности его распространения в виде:

$$\alpha = \frac{10}{L} \lg \frac{P_1}{P_{\min}}. \quad (4)$$

Значение коэффициента потерь α одномодового волокна *PANDA* составляет 0,5 дБ/км (4) на длине волны 1,55 мкм.

При скорости передачи информации, равной B импульсов в секунду ($B \sim 1/\tau$, где τ – длительность импульсов), минимальная

регистрируемая мощность оптического сигнала $P_{\min}$ определяется соотношением

$$P_{\min} = E_{\min}. \quad (5)$$

Здесь $E_{\min}$ – минимальная энергия излучения при регистрации одного оптического импульса:

$$E_{\min} = (9 \lg 10) \hbar \nu, \quad (6)$$

где $\hbar, \nu$ – постоянная Планка и частота излучения соответственно [23].

Для излучения на длине волны 1,5 мкм ($\nu = 2 \cdot 10^{14}$ Гц), $B = 20$ МГц, используя выражения (5), (6), получим $P_{\min} = 10$ мкВт. При мощности излучения нанолазера $P_1 = 3,3$ мкВт, т. е. такой импульс фотоприемником не регистрируется. Заметим, что в случае нормального процесса спонтанного излучения мощность испускаемого излучения пропорциональна NV , где N, V – критическая инверсия и критический объем соответственно. В режиме СИ пиковая мощность испускаемого излучения пропорциональна $(NV)^2$ [4]. В этом случае при мощности излучения нанолазера $P_1 = 10,9$ мкВт сигнал регистрируется и, согласно выражению (4), дальность передачи сигнала по одномодовому волокну составит $L \approx 750$ м.

Выводы. Таким образом, результаты проведенных исследований обосновывают возможность и перспективу использования нанолазеров в режиме сверхизлучения и устройств на их основе для передачи высокоскоростных оптических информационных сигналов. Их применение будет способствовать развитию нанометрологии, нанотехники, информационных и иных технологий.

Выполнен обзор нескольких типов нанолазеров. Показано, что сдерживающим фактором их развития и практического применения является отсутствие общей теории создания и стабилизации параметров излучения нанолазеров. Отмечено, что для использования нанолазеров в информационно-измерительных процедурах должны быть получены импульсы заданной длительности и мощности, реализуемые в режиме СИ.

Выполнены расчеты, доказывающие, что в режиме СИ нанолазеры формируют фемто-

секундные импульсы мощностью 10,9 мкВт, что позволяет передавать сигнал по волокну на дистанцию 750 м.

Библиографический список

1. Stockman M. I. Nanoplasmonics: past, present, and glimpse into future. *Opt. Express*. 2011. Vol. 19, N 22. P. 22029–22106.
2. Hill M. T., Oei Y. S., Smalbrugge B., Zhu Y., de Vries T., van Veldhoven P. J., van Otten F. W. M., Eijkemans T. J., Turkiewicz J. P., de Waardt H., Geluk E. J., Kwon S., Lee Y., Nötzel R. and Smit M. K. Lasing in metallic-coated nanocavities. *Nat. Photonics*. 2007. N 1. P. 589–594.
3. Ding K., Liu Z. C., Yin L. J., Hill M. T., Marell M. J. H., van Veldhoven P. J., Nötzel R. and Ning C. Z. Room-temperature continuous wave lasing in deep-subwavelength metallic cavities under electrical injection. *Phys. Rev. B*. 2012. Vol. 85, Iss. 4. P. 041301(R). DOI:10.1103/PhysRevB.85.041301
4. Ding K., Hill M., Liu Z., Yin L., Sahin D., van Veldhoven P., Geluk E. J., Vries T. D. and Ning C. Record Performance of a CW Metallic Subwavelength-Cavity Laser at Room Temperature. *CLEO: Science and Innovations 2012 (Conference on Lasers and Electro-Optics 2012)*. OSA Technical Digest. San Jose, California United States, 6–11 May 2012, paper CTh4M.3.
5. Khajavikhan M., Simic A., Katz M., Lee J. H., Slutsky B., Mizrahi M., Lomakin V., Fainman Y. Thresholdless nanoscale coaxial lasers. *Nature*. 2012. Vol. 482, N 7384. P. 204–207. DOI:10.1038/nature10840
6. Planet Today, 2017. Самые маленькие в мире лазеры могут уничтожать раковые клетки. URL: <http://planet-today.ru/novosti/nauka/item/71236-samyie-malenkie-v-mire-lazery-mogut-unichtozhat-rakovye-kletki>
7. Lu Y. J., Wang C. Y., Kim J., Chen H. Y., Lu M. Y., Chen Y. C., Chang W. H., Chen L. J., Stockman M. I., Shih C. K., Gwo S. All-color plasmonic nanolasers with ultralow thresholds: autotuning mechanism for single-mode lasing. *Nano Lett.* 2014. Vol. 14, N 8. P. 4381–4388.
8. Noginov M., Zhu G., Belgrave A., Bakker R., Shalae V. M., Narimanov E. E., Stout S., Herz E., Suteewong T., Wiesner U. Demonstration of a spaser-based nanolaser. *Nature*. 2009. Vol. 460, N 7259. P. 1110–1112.
9. Звелто О. *Принципы лазеров*. Пер. с англ. под ред. Т. А. Шмаонова. Изд. 4-е. Санкт-Петербург–Москва–Краснодар: Лань, 2008. 720 с.
10. Dicke R. H. Coherence in Spontaneous Radiation Processes. *Phys. Rev.* 1954. Vol. 93, N 1. P. 99–110.
11. Карачевский Л. Я., Новиков И. И., Гордеев Н. Ю. Механизм сверхизлучения Дике в полупроводниковых гетероструктурах. *Физика и техника полупроводников*. 2004. Т. 38, вып. 7. С. 872–876.
12. Зайцев С. В., Гордеев Н. Ю., Graham L. A., Копчатов В. И., Карачинский Л. Я., Новиков И. И., Huffaker D. L., Копьев П. С. Сверхизлучение в полупроводниках. *Физика и техника полупроводников*. 1999. Т. 33, вып. 12. С. 1456–1461.
13. Лебедев Д. В., Минтаиров А. М., Власов А. С., Давыдов В. Ю., Кулагина М. М., Трошков С. И., Богданов А. А., Смирнов А. Н., Gocalinska A., Juska G.,

- Pelucchi E., Kapaldo J., Rouvimov S., Merz J. L. Лазерная генерация в микродисках с активной областью на основе решеточно-согласованных InP/AlInAs наноструктур. *Журнал технической физики*. 2017. Т. 87, Вып. 5. С. 1066–1071.
14. Ankun Y., Hoang T., Odomatall T. Real-time tunable lasings from plasmonics nanocavity arrays. *Nat. Commun.* 2015. Vol. 6, N 6939. 7 p. DOI: 10.1038/ncomms7939
15. Железняков В. В. Что такое сверхизлучение. *Соросовский образовательный журнал*. 1997. № 4. С. 52–57.
16. Аллен Л., Эберли Дж. *Оптические резонансы и двухуровневые атомы*. Пер. с англ. под ред. В. Л. Стрижевского. Москва: Мир, 1978. 221 с.
17. *Antimonide-Related Strained-Layer Heterostructures* (Optoelectronic Properties of Semiconductors and Superlattices). 1st ed. by M. O. Manasreh (Ed.) Gordon and Breach Science Publ., 1997. 571 p.
18. Зябловский А. А., Дорофеев А. В., Виноградов А. П., Пухов А. А., Андрианов Е. С., Лисянский А. А. Двумерный сверхизлучающий плазмонный лазер. *Проблемы современной физики*. Труды 55-й научной конференции МФТИ. (19–25 ноября 2012) Москва–Долгопрудный–Жуковский: МФТИ, 2012. С. 14–15.
19. Li H., Wolf P., Moser P., Larisch G., Lott J. A. and Bimberg D. Vertical cavity surface-emittine for optical interconnects. *SPIE Newsroom*. 2014. DOI:10.1117/2.1201411.005689
20. Chin A. H., Vaddiraju S., Maslov A. V., Ning C. Z., Sunkara M. K., & Meyyappan, M. Near-infrared semiconductor subwavelength-wire laser. *Appl. Phys. Lett.* 2006. Vol. 88. P. 163115 (3 p.). DOI: 10.1063/1.2198017
21. Van Campenhout J., Rojo-Romeo P., Regreny P., Seassal C., van Thourhout D., Verstuyft S., Di Cioccio L., Fedeli J.-M., Lagahe C. and Baets R. Electrically pumped InP-based microdisk laser integrated with a nanophotonic silicon on insulator waveguide circuit. *Opt. Express*. 2007. Vol. 15, Iss. 11. P. 6744–6749.
22. Gnatenko A. S., Machehkhin Yu. P. Generation mode stability of a fiber ring laser. *Telecommunications and Radio Engineering*. 2015. Vol. 74, N 7. P. 641–647.
23. Жуков А. Е., Крыжановская Н. В., Максимов М. В., Липовский А. А., Савельев А. В., Богданов А. А., Шостак И. И., Моисеев Э. И., Карпов Д. В., Laukkanen J., Tommila J. Лазерная генерация в микродисках сверхмалого диаметра. *Физика и техника полупроводников*. 2014. Т. 48, Вып.12. С. 1666–1670.
24. Дмитриев А. Л. *Оптические системы передачи информации*. Учеб. пособие. СПб.: СПбГУ ИТМО, 2007. 96 с.
- metallic-coated nanocavities. *Nat. Photonics*, 1, pp. 589–594.
3. Ding, K., Liu, Z. C., Yin, L. J., Hill, M. T., Marell, M. J. H., van Veldhoven, P. J., Nöetzel, R. and Ning, C. Z., 2012. Room-temperature continuous wave lasing in deep-subwavelength metallic cavities under electrical injection. *Phys. Rev. B.*, 85(4), pp. 041301(R). DOI:10.1103/PhysRevB.85.041301
4. Ding, K., Hill, M., Liu, Z., Yin, L., Sahin, D., van Veldhoven, P., Geluk, E. J., Vries, T. D. and Ning, C., 2012. Record Performance of a CW Metallic Subwavelength-Cavity Laser at Room Temperature. In: *CLEO: Science and Innovations 2012 (Conference on Lasers and Electro-Optics 2012)*. OSA Technical Digest. San Jose, California United States, 6–11 May 2012, paper CTh4M.3.
5. Khajavikhan, M., Simic, A., Katz, M., Lee, J. H., Slutsky, B., Mizrahi, M., Lomakin, V., Fainman, Y., 2012. Thresholdless nanoscale coaxial lasers. *Nature*, 482(7384), pp. 204–207. DOI:10.1038/nature10840
6. Planet Today, 2017. The world's smallest lasers can destroy cancer cells [online]. Available at: <http://planet-today.ru/novosti/nauka/item/71236-samyie-malenkie-v-mire-lazery-mogut-unichtozhat-rakovye-kletki>
7. Lu, Y. J., Wang, C. Y., Kim, J., Chen, H. Y., Lu, M. Y., Chen, Y. C., Chang, W. H., Chen, L. J., Stockman, M. I., Shih, C. K., Gwo, S., 2014. All-color plasmonicnanolasers with ultralow thresholds: autotuning mechanism for single-mode lasing. *Nano Lett.*, 14(8), P. 4381–4388.
8. Noginov, M., Zhu, G., Belgrave, A., Bakker, R., Shalae, V. M., Narimanov, E. E., Stout, S., Herz, E., Suteewong, T., Wiesner, U., 2009. Demonstration of a spaser-based nanolaser. *Nature*, 460(7259), pp. 1110–1112.
9. Zvelto, O., 2008. *Principles of lasers*. Translated from English and ed. by T. A. Shmaonov. 4 ed. SPb.: Lan Publ. (in Russian).
10. Dicke, R. H., 1954. Coherence in Spontaneous Radiation Processes. *Phys. Rev.*, 93(1), pp. 99–110.
11. Karachevsky, L. Ya., Novikov, I. I., Gordeev, N. Yu., 2004. Dicke superradiance mechanism in semiconductor heterostructures. *Physics and technology of semiconductors*, 38(7), pp. 872–876 (in Russian).
12. Zaitsev, S. V., Gordeev, N. Yu., Graham, L. A., Kopchatov, V. I., Karachinsky, L. Ya., Novikov, I. I., Huaker, D. L., Kopiev, P. S., 1999. Superradiance in semiconductors. *Physics and technology of semiconductors*, 33(12), pp. 1456–1461 (in Russian).
13. Lebedev, D. V., Mintairov, A. M., Vlasov, A. S., Davydov, V. Yu., Kulagina, M. M., Troshkov, S. I., Bogdanov, A. A., Smirnov, A. N., Gocalinska, A., Juska, G., Pelucchi, E., Kapaldo, J., Rouvimov, S., Merz, J. L., 2017. Laser generation in microdiscs with an active region based on lattice-matched InP/AlInAs nanostructures. *Journal of Technical Physics*. 87(5), pp. 1066–1071 (in Russian).
14. Ankun, Y., Hoang, T., Odomatall, T., 2015. Real-time tunable lasings from plasmonics nanocavity arrays. *Nat. Commun.* 4(6939), pp. 1–7.
15. Zheleznyakov, V. V., 1997. What is superradiance. *Soros Educational Journal*. 4, pp. 52–57 (in Russian).
16. Allen, L., Eberly, J., 1978. *Optical resonances and two-level atoms*. Translated from English and ed. by V. L. Strizhevskiy. Moscow: Mir Publ. (in Russian).

REFERENCES

1. Stockman, M. I., 2011. Nanoplasmonics: past, present, and glimpse into future. *Opt. Express*, 19(22), pp. 22029–22106.
2. Hill, M. T., Oei, Y. S., Smalbrugge, B., Zhu, Y., de Vries, T., van Veldhoven, P. J., van Otten, F. W. M., Eijkemans, T. J., Turkiewicz, J. P., de Waardt, H., Geluk, E. J., Kwon, S., Lee, Y., Nötzel, R. and Smit, M. K., 2007. Lasing in

17. Manasreh, M. O. ed., 1997. *Antimonide-Related Strained-Layer Heterostructures* (Optoelectronic Properties of Semiconductors and Superlattice). 1st ed. Gordon and Breach Science Publ.
18. Zyablovsky, A. A., Dorofeenko, A. V., Vinogradov, A. P., Pukhov, A. A., Andrianov, E. S., Lisyanskiy, A. A., 2012. Two-dimensional superradiant plasmon laser. In: *55th Scientific Conference MIPT-2012. Problems of modern physics*. Moscow, Russia, 19–25 Nov. 2012, pp. 14–15 (in Russian).
19. Li, H., Wolf, P., Moser, P., Larisch, G., Lott, J. A. and Bimberg, D., 2014. Vertical cavity surface-emitting for optical interconnects. *SPIE Newsroom*. DOI:10.1117/2.1201411.005689
20. Chin, A. H., Vaddiraju, S., Maslov, A. V., Ning, C. Z., Sunkara, M. K., & Meyyappan, M., 2006. Near-infrared semiconductor subwavelength-wire laser. *Appl. Phys. Lett.*, **88**, P. 163115 (3 p.). DOI: 10.1063/1.2198017
21. Van Campenhout, J., Rojo-Romeo, P., Regreny, P., Seassal, C., van Thourhout, D., Verstuyft, S., Di Cioccio, L., Fedeli, J.-M., Lagahe, C. and Baets, R., 2007. Electrically pumped InP-based microdisk laser integrated with a nanophotonic silicon on insulator waveguide circuit. *Opt. Express*, **15**(11), pp. 6744–6749.
22. Gnatenko, A. S., Machekhin, Yu. P., 2015. Generation mode stability of a fiber ring laser. *Telecommunications and Radio Engineering*, **74**(7), pp. 641–647.
23. Zhukov, A. E., Kryzhanovskaya, N. V., Maksimov, M. V., Lipovskiy, A. A., Savel'ev, A. V., Bogdanov, A. A., Shostak, I. I., Moiseev, E. I., Karpov, D. V., Laukkanen, J., Tommila, J., 2014. Laser generation in microdisks of ultra-small diameter. *Physics and technology of semiconductors*. **48**(12), pp. 1666–1670 (in Russian).
24. Dmitriev, A. L., 2007. *Optical information transmission systems*. SPb.: SPbSU ITMO Publ. (in Russian).

Рукопись поступила 18.02.2018.

Yu. P. Machekhin, Yu. S. Kurskoy,
A. S. Gnatenko, V. A. Tkachenko

SUPERRADIANCE OF NANOLASERS IN INFORMATION-MEASURING PROCEDURES

Subject and purpose. The subject of the paper is superradiation of nanolasers and its process of quantum dot formation, increased concentration of nonequilibrium charge carriers, as well as physical principles of nanolasers operation with superradiation in telecommunication systems. The purpose of the work is to substantiate the possibility of using nanoscale lasers in the regime of superradiance and devices based on them to solve problems of transmission of high-speed optical information signals and tasks of stabilization of the radiation frequency.

Methods and methodology. Several types of nanolasers have been reviewed. It was determined that despite the creation of a number of designs, a general theory of stabilizing the parameters of nanolaser radiation is not developed, which is a deterrent to the development of this type of lasers and their practical application. To use nano-

lasers in information-measuring procedures, the problems of stabilizing the radiation frequency, obtaining pulses of a predetermined duration (of femtosecond order), and the peak power must be solved. To provide pulsed radiation with the necessary parameters, the authors propose to use the superradiance regime previously discovered in semiconductor heterostructures and expressed in a sharp increase in the radiation power. The analysis of the conditions for the formation of superradiance in the domain structure of semiconductors is based on the theoretical model for describing the concentration of nonequilibrium carriers (electrons and holes) in the active region of the laser.

Results. The process of the appearance of superradiation in nanolasers and the possibility of using this effect are considered. It is proved that highpower femtosecond pulses are formed in nanolasers with superradiance.

Conclusions. The results of the conducted studies substantiate the possibility and prospect of using nanolasers in the regime of superradiation and devices based on them for the transmission of high-speed optical information signals, the creation of new optical frequency standards and photonics devices. Their application will contribute to the development of nanometrology, nanotechnology, information and other technologies. Calculations have been performed to prove that in the superradiance regime, nanolasers generates femtosecond pulses with a power of 10.9 μ W, which allows the signal to be transmitted of optical fiber to a distance of 750 m. In the future, work is planned to increase the power of such lasers to transmit information over longer distances.

Key words: nanolaser, superradiance, frequency stabilization, photonics, generation of radiation.

Ю. П. Мачехин, Ю. С. Курский,
О. С. Гнатенко, В. А. Ткаченко

НАДВИПРОМІНЮВАННЯ НАНОЛАЗЕРІВ В ІНФОРМАЦІЙНО-ВИМІРЮВАЛЬНИХ ПРОЦЕДУРАХ

Предмет і мета роботи. Предметом дослідження є надвипромінювання нанолазерів і процес його формування квантовими точками, підвищеною концентрацією нерівноважних носіїв заряду, а також фізичні принципи роботи нанолазерів з надвипромінюванням в телекомунікаційних системах. Метою роботи є обґрунтування можливості використання нанолазерів у режимі надвипромінювання та пристроїв на їх основі для вирішення завдань передачі високошвидкісних оптичних інформаційних сигналів та задач стабілізації частоти випромінювання.

Методи та методологія роботи. Виконано огляд декількох типів нанолазерів. Зазначено, що незважаючи на створення ряду конструкцій, ще не розроблено загальну теорію стабілізації параметрів випромінювання нанолазерів, що є стримуючим фактором розвитку цього типу лазерів і їх практичного застосування. Для використання нанолазерів у інформаційно-вимірвальних процедурах мають бути вирішені завдання стабілізації частоти випромінювання, отримання імпульсів заданої тривалості (фемтосекундного порядку) та пікової потужності. Для забезпечення імпульсного випромінювання з необхідними параметрами автори пропо-

нують використовувати режим надвипромінювання, який раніше був виявлений у напівпровідникових гетероструктурах і виражений в різкому зростанні потужності випромінювання. Проведений аналіз умов формування надвипромінювання в доменній структурі напівпровідників базується на теоретичній моделі опису концентрації нерівноважних носіїв (електронів та дірок) в активній області лазера.

Результати роботи. Розглянуто процес виникнення надвипромінювання в нанолазерах і можливість використання цього ефекту. Доведено, що в режимі надвипромінювання в нанолазерах формуються фемтосекундні імпульси високої пікової потужності.

Висновки. Результати проведених досліджень доводять можливість та перспективу використання нано-

лазерів у режимі надвипромінювання та пристроїв на їх основі для передачі високошвидкісних оптичних інформаційних сигналів, створення нових оптичних стандартів частоти і пристроїв фотоніки. Їх застосування сприятиме розвитку нанометрології, нанотехніки, інформаційних та інших технологій. Виконано розрахунки, що доводять, що в режимі надвипромінювання наноласери формують фемтосекундні імпульси потужністю 10,9 мкВт, що дозволяє передавати сигнал по оптичному волокну на дистанцію 750 м. У подальшому плануються роботи щодо збільшення потужності таких лазерів для передачі інформації на довші дистанції.

Ключові слова: нанолазер, надвипромінювання, стабілізація частоти, фотоніка, генерація випромінювання.