

в пределах 10.0—13.0 кВ, а каждому спектру соответствует испарение материала на глубину 51—20 Å. Таким образом, последовательность спектров соответствует анализу на глубину порядка 1000—2000 Å. По характеру испарения легких ионов (водорода) и больших атомарных комплексов можно оценить, что внутренние структурные образования волокна — кристаллиты и объемные поры имеют размеры порядка сотен Å. При сравнении подобных спектров для всех исследованных материалов обращает на себя внимание отличие в характере испарения для волокон серии ПАН УВ, с одной стороны, и для волокон типа ровилона и пирюсов, с другой. У последних испаряется достаточная доля атомарных комплексов с большими массами, чего практически нет у ПАН УВ. Вероятно, это связано с фибрильной структурой ПАН волокон, дающей равномерное испарение.

В заключение следует отметить, что полученные с помощью масс-спектрометрического анализа данные развивают современные представления о структурных особенностях углеродных материалов, что позволяет развивать технологию изготовления таких материалов с необходимыми для эффективных автокатодов свойствами.

### Список литературы

- [1] Углеродные волокна и углекомпозиаты // Под ред. Э. Фитцера. М.: Мир. 1988. 335 с.
- [2] *Stewart D., Wilson P.* // *Vacuum*. 1980. Vol. 30. N 11—12. P. 527—532.
- [3] *Futamoto M., Hosoki S., Yamamoto S., Kawabe U.* // *Jap. J. Vacuum*. 1980. Vol. 23. N 9. P. 430—437.
- [4] *Ксенофонтов В. А., Михайловский И. М., Кулько В. Б.* // *ЖТФ*. 1983. Т. 53. Вып. 8. С. 1583—1587.
- [5] *Бондаренко Б. В., Селиверстов В. А., Шешин Е. П.* // *РЭ*. 1985. Т. 30. № 8. С. 1601—1605.
- [6] *Бондаренко Б. В., Черепанов А. Ю., Шаховской А. Г.* и др. // *Электронная техника. Сер. 1. Электроника СВЧ*. 1987. № 10. С. 45—48.
- [7] *Бондаренко Б. В., Шаховской А. Г., Шешин Е. П.* // *РЭ*. 1987. Т. 32. № 1. С. 199—201.
- [8] *Дранова Ж. И., Ксенофонтов В. А., Кулько В. Б.* и др. // *ПТЭ*. 1980. № 6. С. 166—167.

Институт проблем кибернетики АН СССР  
Москва

Поступило в Редакцию  
13 февраля 1990 г.

В окончательной редакции  
28 января 1991 г.

06; 07

*Журнал технической физики, т. 61, в. 6, 1991*

© 1991 г.

## ОДНОЧАСТОТНЫЙ ЛАЗЕР С УЗКОЙ ЛИНИЕЙ ГЕНЕРАЦИИ НА ОСНОВЕ МНОГОМОДОВОГО ИНЖЕКЦИОННОГО ИЗЛУЧАТЕЛЯ С ВНЕШНИМ РЕЗОНАТОРОМ МАЛОЙ ДЛИНЫ

*В. Н. Королев, А. С. Красильщиков, А. В. Маругин, А. В. Харчев*

Развитие волоконной оптической связи, квантовой метрологии, лазерной спектроскопии определяет заметный интерес к исследованию и разработке инжекционных лазеров (ИЛ) с узкой линией излучения. Эффективным способом управления спектром генерации ИЛ является использование его в системе с внешним резонатором. Внешний резонатор с длиной много больше размеров самого ИЛ позволяет достичь узкой линии излучения [1]. Однако сложной проблемой для такого лазера является осуществление устойчивой одночастотной генерации по модам внешнего резонатора [2]. С другой стороны, ИЛ с коротким внешним резонатором длиной порядка сотни микрон обладает устойчивым одномодовым спектром [3]. Однако такой лазер не позволяет получать ширины линии генерации ниже значения, обусловленного добротностью собственного резонатора ИЛ [4].

Поэтому особый интерес представляет исследование ИЛ с внешним резонатором с длиной, сравнимой или в несколько раз большей оптической длины собственного резонатора, т. е. порядка одного или нескольких миллиметров. В таком лазере с помощью одного внешнего отражателя без использования дисперсионных элементов возможно осуществить эффективную селекцию мод ИЛ и одновременное сужение ширины линии выделенной моды ге-

рации. Один из вариантов лазера этого типа был создан на основе инжекционного излучателя Hitachi HLS 5400 и внешнего резонатора из градиентной линзы [5].

В данной работе сообщается об экспериментальной реализации и исследовании одночастотного лазера с узкой линией генерации на основе промышленного многомодового ИЛ с внешним резонатором длиной несколько миллиметров, содержащим микролинзу и плоско-сферический элемент для оптимального формирования пучка лазерного излучения.

Оптическая схема лазера показана на рис. 1. В качестве излучателей использовались многомодовые ИЛ на полосковых GaAs/AlGaAs структурах. Оптические длины собственных резонаторов ИЛ  $nl$  принимали значения 0,8—1 мм ( $n$  — показатель преломления активной среды,  $l$  — геометрическая длина излучателя). Пороговые токи ИЛ составляли 70—100 мА. Внешний резонатор формировался плоским диэлектрическим зеркалом, на поверхности которого размещалась плоскосферическая микролинза. Длина внешнего резонатора  $L$  менялась от 1 до 4 мм, при этом использовались различные микролинзы, фокусные расстояния

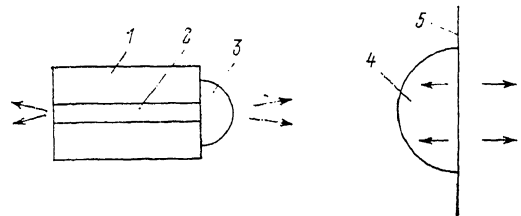


Рис. 1. Оптическая схема лазера с внешним резонатором.

1 — инжекционный лазер, 2 — волновод инжекционного лазера, 3 — плоскосферический элемент, 4 — микролинза, 5 — внешнее зеркало.

которых соответствовали значению  $L$ . Коэффициент отражения зеркала с расположенной на его поверхности микролинзой составлял примерно 50 %.

Для увеличения уровня оптической связи активной области с внешним зеркалом на торце кристалла ИЛ соосно с его волноводом размещался плоскосферический элемент (ПСЭ) с радиусом кривизны 50—70 мкм из вещества с показателем преломления 2,1. Использование ПСЭ позволило снизить aberrации излучения полоскового ИЛ и улучшить условия формирования пучка во внешнем резонаторе [6]. Кроме того, наличие ПСЭ на лазерном кристалле приводило к частичному просветлению зеркала собственного резонатора ИЛ до значения коэффициента отражения приблизительно 8 %. Это позволило осуществить более эффективную селекцию мод излучения внешним резонатором [7].

Следует отметить, что излучение, выходящее через полупрозрачное внешнее зеркало, является сфокусированным в пучок, близкий к параллельному с диаметром порядка миллиметра, и может быть использовано в качестве полезного излучения лазера.

Значение эффективного коэффициента отражения внешнего зеркала  $R_e$  (с учетом потерь на ввод излучения в волновод лазерного кристалла) определялось по изменению порогового тока ИЛ, вызванному внешним резонатором с помощью измеренной зависимости усиления в активной области от тока накачки [8]. Для длины внешнего резонатора 4 мм коэффициент  $R_e$  принимал значение 5—6 %. При уменьшении длины  $L$  до 1 мм и использовании соответствующих короткофокусных микролинз значение  $R_e$  возрастало до 7—8 %. Такая зависимость объясняется тем, что степень влияния aberrаций излучения ИЛ и микролинзы на формирование пучка во внешнем резонаторе снижается с уменьшением длины  $L$ . Применение ПСЭ на торце лазерного кристалла позволило увеличить значение  $R_e$  в 3 и 8 раз для длин внешнего резонатора 1 и 4 мм соответственно по сравнению с лазером, содержащим только одну микролинзу на внешнем зеркале.

Достигнутое в эксперименте значение  $R_e$  позволило осуществить эффективное управление спектральными характеристиками излучения лазера.

Внешнее зеркало, удаленное от ИЛ на расстояние, сравнимое с его оптической длиной, формирует так называемый короткий внешний резонатор [3, 7]. Такой резонатор выделяет в спектре генерации моду ИЛ, для которой излучение, отраженное внешним зеркалом в активную область, находится в фазе с излучением внутри нее. Длина внешнего резонатора  $L$  выбиралась из следующего условия:

$$L = mn\lambda + \frac{n\lambda}{\alpha}, \quad (1)$$

где  $m$  — целое число, в условиях эксперимента менявшееся от 1 до 4;  $\alpha > 1$  — параметр, определяющий спектральный диапазон между продольными модами ИЛ, выделяемыми внешним резонатором.

Параметр  $\alpha$  выбирался из условия достижения максимального значения коэффициента подавления соседних с центральной продольных мод, т. е. отношения интенсивностей доминирующей и наибольшей из подавляемых мод. В эксперименте  $\alpha$  имело значение 8.

Спектр излучения лазера для внешнего резонатора длиной примерно 4 мм ( $m=4$ ,  $\alpha=8$ ) показан на рис. 2, а. Доминирующая мода представлена в масштабе, в 10 раз меньшем, чем остальные. Для сравнения приведен спектр того же ИЛ без внешнего резонатора (рис. 2, б).

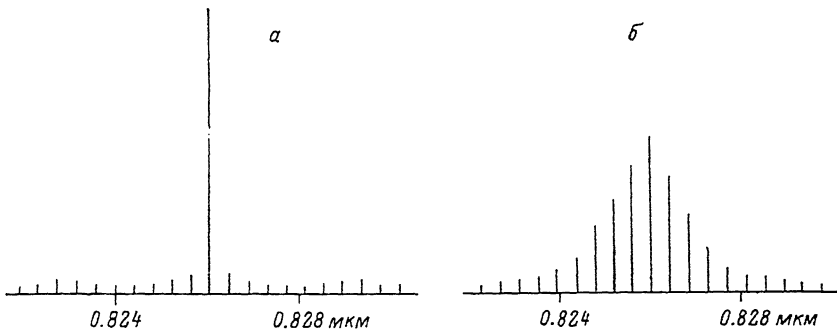


Рис. 2.

Оба спектра показаны для токов накачки, превышающих пороговые значения на 15 мА.

Следует отметить, что при увеличении длины внешнего резонатора (росте значения  $m$ ) ухудшается селекция мод излучения. Это объясняется главным образом уменьшением спектрального периода модуляции излучательных потерь, обусловленных внешним резонатором, что приводит к уменьшению дефицита усиления между селективируемыми модами [8].

Вместе с тем при увеличении длины внешнего резонатора происходит сужение линии генерации доминирующей моды, спектральная ширина которой может быть выражена следующим образом [10]:

$$\Delta\nu = \frac{\Delta\nu_0}{\left(1 + (1 - R_0) \sqrt{\frac{R_0}{R_0} \frac{L}{nl}}\right)^2}, \quad (2)$$

где  $\Delta\nu$ ,  $\Delta\nu_0$  — ширины линий моды ИЛ с внешним резонатором и без него соответственно при одинаковой мощности излучения в моде;  $R_0$  — коэффициент отражения зеркала собственного резонатора ИЛ, отраженного во внешний резонатор.

Изменение спектральных характеристик излучения лазера с ростом длины

внешнего резонатора показано на рис. 3. Здесь приведены экспериментальная зависимость коэффициента подавления соседних с доминирующей мод  $K$  (кривая 1) и расчетная зависимость степени сужения ширины линии  $\Delta\nu_0/\Delta\nu$  (кривая 2) от длины  $L$ . Кривая 1 показана для тока накачки лазера, превышающего пороговое значение на 15 мА.

Как видно из графиков, внешний резонатор длиной около 4 мм позволяет одновременно достичь одночастотной генерации с подавлением соседних мод более чем в 100 раз и уменьшить ширину линии излучения выделенной моды примерно в 15 раз. Ширина линии генерации контролировалась с помощью сканирующих конфокального интерферометра с базой 30 см и резкостью примерно 40 и интерферометра с плоскими зеркалами с резкостью 15—20 и переменной от 2 до 10 см базой.

Следует отметить, что результирующая ширина линии излучения лазера зависит от ее начального значения  $\Delta\nu_0$ . Для использованных в эксперименте полосковых ИЛ ширина линий, обусловленная добротностью собственного резонатора при генерации в одномодовом режиме (что достигалось путем использования коротковолнового внешнего резонатора длиной около 100 мкм, для которого из (2) следует  $\Delta\nu \approx \Delta\nu_0$ ), составляла в развитом режиме генера-

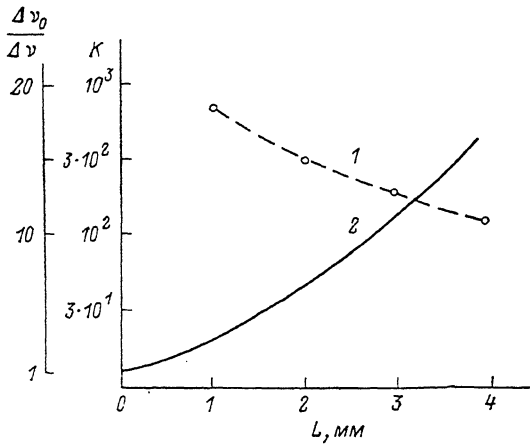


Рис. 3.

ции для различных образцов 200—500 МГц. С внешним резонатором длиной примерно 4 мм ширина линии излучения лазера уменьшалась до 15—30 МГц.

Для реализации лазера с более узкой линией излучения и лучшим подавлением соседних мод необходимо использовать ИЛ с изначально более хорошими спектральными характеристиками, которые могут быть достигнуты, например, в лазерах со встроенными волноводами.

Итак, в данной работе сообщается об экспериментальной реализации ИЛ с внешним резонатором длиной несколько миллиметров, позволившим получить одночастотный режим генерации с одновременным сужением спектральной ширины линии в 10—15 раз. Высокая эффективность внешнего резонатора обусловлена большим уровнем оптической связи активной области с внешним зеркалом, достигнутым за счет использования во внешнем резонаторе согласующей микролинзы и плоскосферического элемента, расположенного на лазерном кристалле. Предложенный лазер удобен технологически, в нем не применяются дисперсионные элементы, его конструкция обеспечивает коллимирование выходного полезного излучения в параллельный пучок. Такие лазеры могут найти широкое применение в различных областях.

### Список литературы

- [1] Беленов Э. М., Величанский В. Л., Вибров А. С. и др. // Квантовая электрон. 1983. Т. 10. № 6. С. 1232—1243.
- [2] Tkach R. W., Chraplyvy A. R. // J. Lightwave Technology. 1986. Vol. LT-4. N 11. P. 1655—1661.
- [3] Hamada K., Shimizu H., Wada M. et al. // IEEE J. Quantum Electron. 1986. Vol. QE-22. N 12. P. 2187—2190.
- [4] Бессонов Ю. Л., Корнилова Н. Б., Курносов В. Д. и др. // Квантовая электрон. 1986. Т. 13. № 5. С. 1070—1072.
- [5] Chan Y. F., Cormack G. D. // WESCANEX 88. Conf. Proc. New York, 1988. P. 119—121.
- [6] Chinone N., Yamashita S., Nakatsuka S. et al. United States Patent. N 4780879.
- [7] Jianglin W., Hanyi Z., Qun W., Bingkun Z. // IEEE J. Quantum Electron. 1987. Vol. QE-23. N 6. P. 1005—1009.
- [8] Hakki B. W., Paoli T. L. // J. Appl. Phys. 1973. Vol. 44. N 9. P. 4113—4119.
- [9] Sato H., Fujita T., Ohya J. // IEEE J. Quantum Electron. 1985. Vol. QE-21. N 4. P. 284—291.
- [10] Saito S., Nilsson O., Jamamoto J. // IEEE J. Quantum Electron. 1982. Vol. QE-18. N 6. P. 61—968.

Горьковский государственный университет  
им. Н. И. Лобачевского

Поступило в Редакцию  
26 марта 1990 г.

06; 07

Журнал технической физики, т. 61, в. 6, 1991

© 1991 г.

## БИСТАБИЛЬНЫЙ И АВТОКОЛЕБАТЕЛЬНЫЕ РЕЖИМЫ ПРИ ВЗАИМОДЕЙСТВИИ МОД В НЕЛИНЕЙНОМ ПОЛУПРОВОДНИКОВОМ ИНТЕРФЕРОМЕТРЕ

Ю. И. Балкарей, А. С. Коган

1. В работе [1] проведен качественный анализ режимов возбуждения бистабильного полупроводникового интерферометра Фабри—Перо с концентрационным механизмом оптической нелинейности, в котором возникает взаимодействие двух конкурирующих мод: моды, возбуждаемой внешней монохроматической волной, и лазерной моды, генерируемой в полупроводнике, по отношению к которой первая мода выступает как оптическая накачка. Показано, что вследствие конкуренции мод могут возникнуть высокочастотные ( $\omega \sim 10^9 - 10^{10} \text{ с}^{-1}$ ) импульсные автоколебания неравновесных носителей заряда в полупроводнике и связанные с ними пульсации лазерной генерации, а также колебания в пропускании и отражении резонатором внешней волны.

В данной работе приводятся результаты численного моделирования указанной системы. Обнаруживается возможность управления частотой автопульсаций в широких пределах при изменении интенсивности внешней волны.