

ОПТИКА И СПЕКТРОСКОПИЯ

УДК 535.33:621.373.8

**АКТИВНАЯ СИНХРОНИЗАЦИЯ МОД В КОЛЬЦЕВОМ ЛАЗЕРЕ
НА ОСНОВЕ ПОЛУПРОВОДНИКОВОГО ОПТИЧЕСКОГО
УСИЛИТЕЛЯ****В. В. Акпаров, В. П. Дураев^{*}), А. С. Логгинов, Е. Т. Неделин^{*})***(кафедра физики колебаний)*

E-mail: aslogginov@phys.msu.ru

Проведены исследования режима работы кольцевого лазера на основе полупроводникового оптического усилителя, показана возможность получения коротких оптических импульсов в режиме активной синхронизации мод лазера и высокочастотных электрических колебаний, определяемых частотой межмодовых биений.

Введение

Кольцевые лазеры [1] можно классифицировать по геометрии резонатора и типу используемой активной среды. Резонатор может иметь разнообразную форму — треугольника, квадрата, круга, образованных зеркалами, оптическим волокном или интегрально-оптическим волноводом. Кольцевые лазеры могут иметь разную конфигурацию: либо активная среда заполняет резонатор не полностью, тогда остальная его часть является внешней, либо же весь кольцевой резонатор заполнен активной средой. В качестве активных сред при построении кольцевых лазеров используют твердотельные и полупроводниковые материалы, жидкости и газы [2–4].

Интерес к изучению кольцевых полупроводниковых лазеров возник в связи с возможностью их применения в лазерных гироскопах [5–7], что может сделать эти устройства более компактными и дешевыми, заменив гироскопы, использующие газовые лазеры. Помимо этого кольцевые полупроводниковые лазеры могут служить основой для создания высокостабильных генераторов сверхвысокочастотных колебаний [8, 9]. Стабильность их частоты может быть сравнима со стабильностью частоты лазерного излучения.

В настоящей работе выполнен эксперимент с использованием отечественной элементной базы, который, по сведениям авторов, является в России первым шагом в исследовании кольцевых полупроводниковых лазеров на основе оптических усилителей. Показана возможность генерации коротких оптических импульсов с использованием кольцевого лазера, а также выявлены основные трудности, лежащие на пути совершенствования таких систем.

Экспериментальная установка

Полупроводниковый оптический усилитель (ПОУ) представляет собой лазерный диод, коэффи-

циент обратной связи в котором стремится к нулю за счет просветления зеркал резонатора. Достичь полного просветления практически не удастся, и такой усилитель, так же как и лазер, можно характеризовать ватт-амперной характеристикой. Пороговый ток такого устройства служит мерой качества просветления зеркал. Уменьшение порогового тока при замыкании волоконных выводов усилителя свидетельствует о генерации когерентного излучения за счет обратной связи, возникающей при замыкании волоконного кольца.

Для измерения основных статических и динамических параметров ПОУ и полупроводникового кольцевого лазера (ПКЛ) на его основе использовалась экспериментальная установка, блок-схема которой приведена на рис. 1.

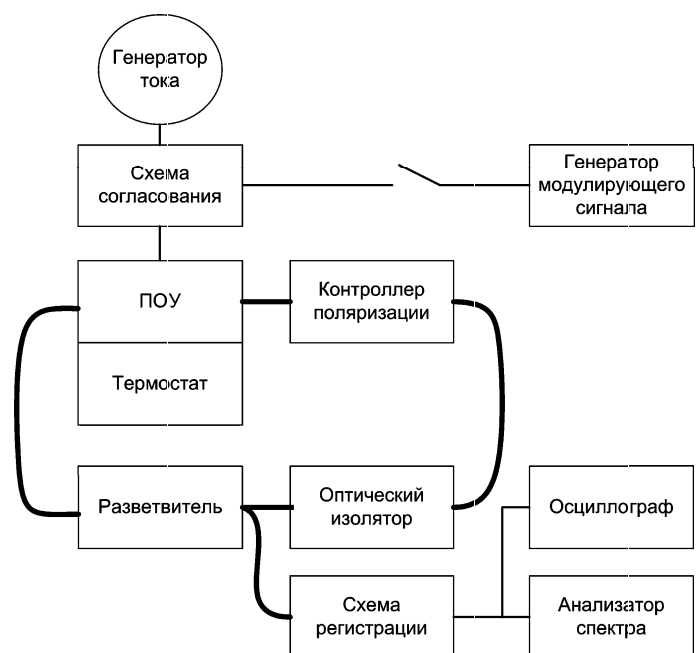


Рис. 1. Блок-схема экспериментальной установки

*) НИИ «Полюс», Москва.

Основным компонентом установки является исследуемый кольцевой лазер, образованный ПОУ и отрезком оптического волокна. Для регистрации параметров оптического излучения, генерируемого в кольцевом лазере, в цепь обратной связи включен Y-образный оптический разветвитель с коэффициентом деления 50:50. Температура ПОУ поддерживается постоянной с помощью устройства термостатирования. В кольцевом резонаторе могли быть установлены: контроллер поляризации излучения, основанный на эффекте поворота плоскости поляризации излучения в волокне при внешнем механическом воздействии на него, и оптический изолятор, принцип действия которого основан на эффекте Фарадея. Питание лазера осуществлялось с помощью генератора тока, подключаемого через схему согласования, обеспечивающую разделение цепей питания ПОУ по постоянному и переменному токам. В состав установки входил генератор гармонических колебаний Г4-116, задававший переменную составляющую тока накачки, модулирующего коэффициент усиления ПОУ. Регистрация излучения на длине волны $\lambda = 1.55$ мкм, генерируемого ПОУ или ПКЛ, осуществлялась фотоприемником типа ФДМ-14-2К, представляющим собой германиевый PIN фотодиод с максимумом чувствительности на длине волны 1.55 мкм в DIP корпусе с волоконным входом. Для наблюдения регистрируемого фотоприемником оптического сигнала на выходе ПОУ или кольцевого лазера использовались осциллограф С1-75 или анализатор спектра С4-74.

Оптический усилитель был собран в модуле с волоконными выходами, оканчивающимися оптическими разъемами. В модуле также расположены: элемент Пельтье (микрохолодильник) и терморезистор ТР2, которые позволяют задавать температурный режим ПОУ. В случае измерения параметров кольцевого лазера «доступ» к излучательным процессам внутри лазера и контроль параметров излучения обеспечивает волоконный Y-разветвитель, с выхода которого излучение попадает на фотоприемный модуль. Все оптические элементы установки используют одномодовое оптическое волокно с диаметром сердцевины 9 мкм и диаметром внешней оболочки 125 мкм. Волокно заключено в защитный кожух диаметром 0.9 мм. На концах волокна расположены оптические разъемы типа FC/APC.

На рис. 2, *а* приведен оптический спектр излучения ПОУ, полученный на анализаторе Anritsu. Хорошо заметна модовая структура, определяемая резонатором Фабри–Перо, образованным не полностью просветленными торцами кристалла. Спектр излучения ПОУ при замыкании волоконных соединителей в кольцо представлен на рис. 2, *б*. Резкое сужение спектра генерируемого излучения свидетельствует о наличии эффекта вынужденного излучения, т. е. о работе кольцевого лазера. Ватт-амперные характеристики оптического усилителя

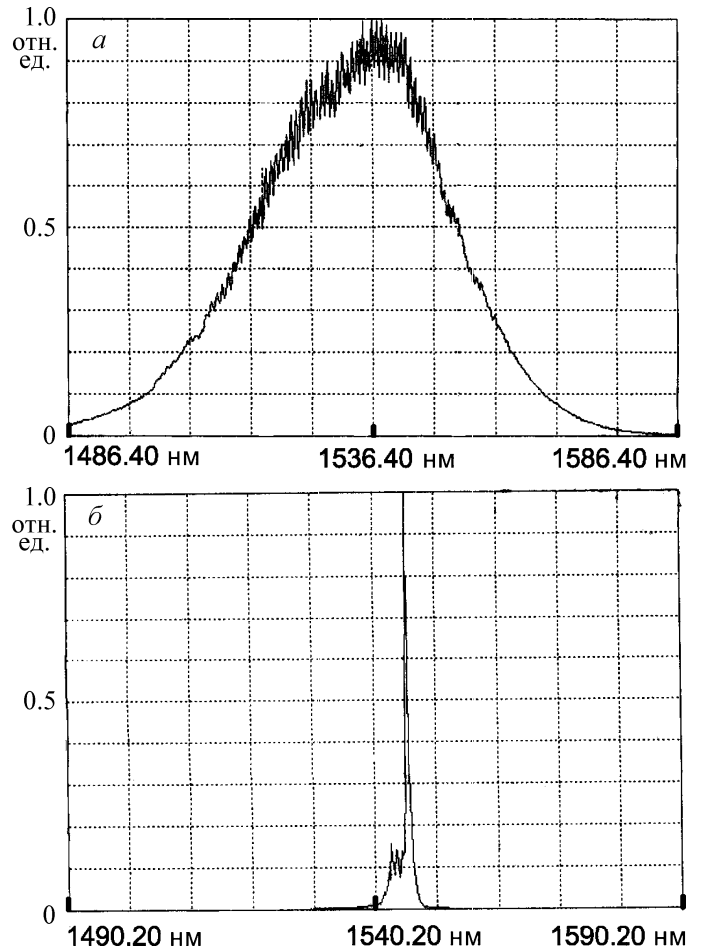


Рис. 2. Спектр излучения оптического усилителя: *а* — с разомкнутыми волоконными выходами, *б* — с замкнутыми в кольцо волоконными выходами

с замкнутым и разомкнутым волоконным резонатором приведены на рис. 3. На них видно снижение порогового тока и значительное возрастание мощности излучения при замыкании кольца обратной связи, что подтверждает наличие генерации.

Результаты и обсуждение

При длине кольцевого резонатора исследуемого лазера 3–5 м межмодовый интервал генерируемых типов колебаний существенно меньше интервала между продольными модами типичных лазеров с резонатором Фабри–Перо (длиной около 300 мкм) и составляет 30–60 МГц в зависимости от длины резонатора. Из теории синхронизации [10] известно, что внешняя синхронизация мод возможна при условии внешнего периодического воздействия, осуществляемого на частоте, близкой к частоте межмодовых биений. В качестве такого воздействия можно использовать модуляцию коэффициента усиления ПОУ, осуществляемую генератором переменного тока накачки.

Для осуществления активной синхронизации мод был использован генератор стандартных сигналов Г4-116, работающий в диапазоне частот от 4 до 300 МГц. Глубина модуляции тока в зависимости от выбора рабочей точки ПОУ составляла 20–30%.

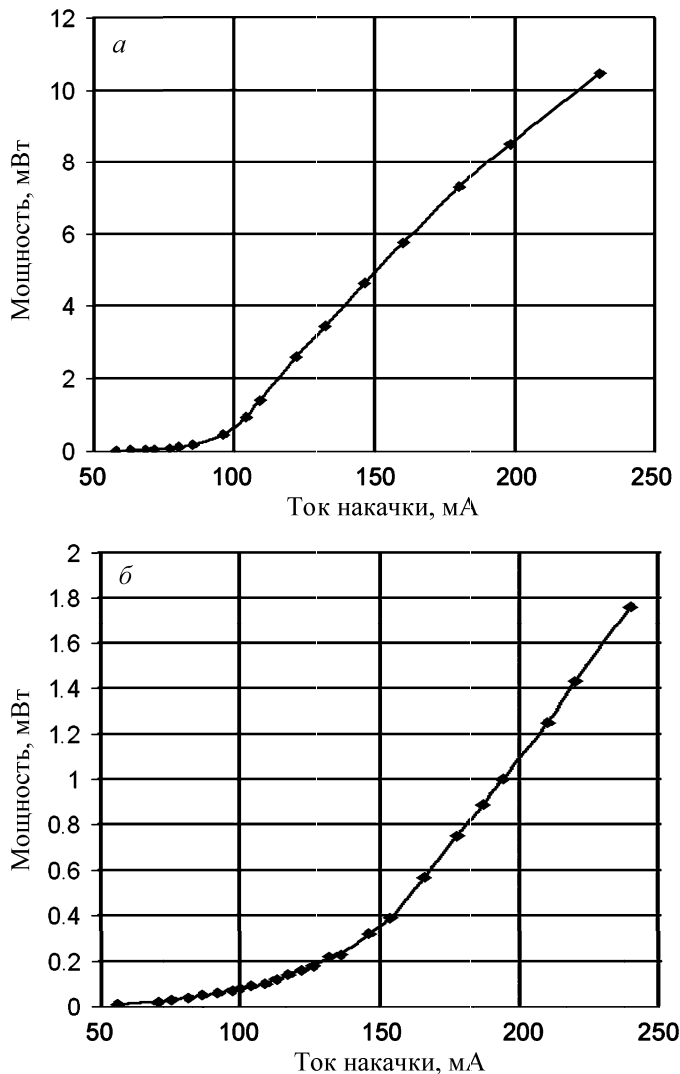


Рис. 3. Ватт-амперная характеристика оптического усилителя: *a* — с разомкнутыми волоконными выходами, *б* — с замкнутыми в кольцо волоконными выходами

При постоянном токе накачки ПОУ 110 мА и замыкании волоконного кольца длиной 3.55 м в световом отклике, регистрируемом фотоприемником, наблюдалось возникновение переменной составляющей. С использованием анализатора спектра С4-74 было установлено, что спектр отклика представляет собой линию с центральной частотой около 57 МГц и полушириной около 5 МГц. Наблюдение велось в отсутствие внешней модуляции тока накачки. При разрывании обратной связи линия исчезала. Это говорит о том, что ее происхождение связано именно с работой кольцевого лазера. Отметим, что частота 57 МГц близка к частоте межмодовых биений в кольцевом лазере с длиной кольца 3.55 м. Это свидетельствует о работе лазера в многомодовом режиме.

После введения в схему измерения предусилителя сигнала с фотодетектора стало возможным наблюдение спектральных линий на частотах 57, 114, 171, 228 и 275 МГц, кратных частоте межмодовых биений. При увеличении длины кольца до $L_{ring} = 5.55$ м

спектр межмодовых биений содержал частоты 34, 68, 102, 136, 170, 204 и 238 МГц.

Таким образом, наблюдаемые линии представляют собой частоты, кратные частоте межмодового интервала кольцевого резонатора, при этом сами линии соответствуют наличию комбинационных частот межмодовых биений. На рис. 4 приведены спектры сигналов с фотодиода для различных длин кольца. Полоса обзора анализатора спектра (300 МГц) не позволила установить полное число комбинационных частот и связать его с полушириной оптического спектра излучения.

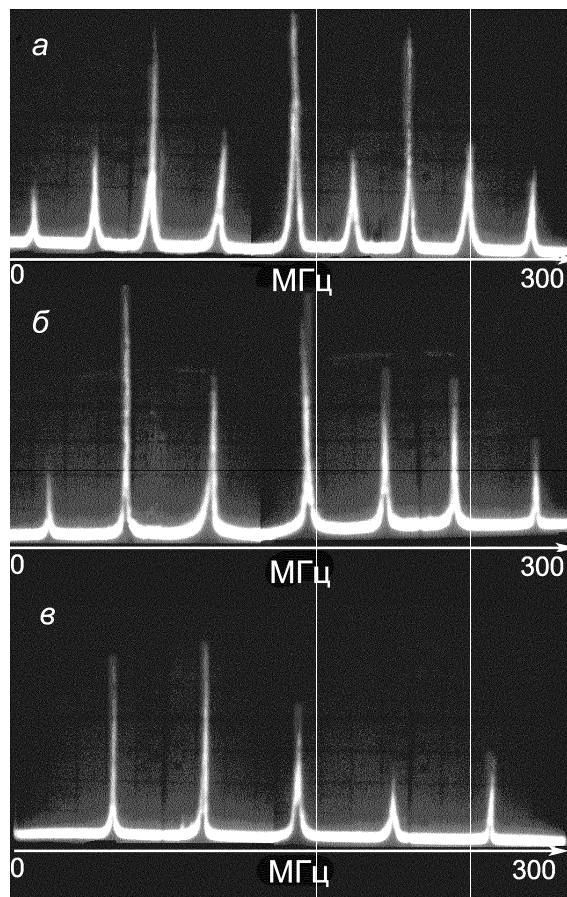


Рис. 4. Радиочастотный спектр межмодовых биений для различных длин волоконного кольцевого резонатора: 5.55 (*a*), 4.55 (*б*) и 3.55 м (*в*)

Полученный результат говорит о наличии многомодового режима работы кольцевого лазера, что является достаточным условием для создания стабильного генератора СВЧ-колебаний путем введения обратной электронно-оптической связи между фотоприемником и источником оптического излучения.

Путем модуляции тока ПОУ, замкнутого волоконным кольцом, была получена амплитудно-частотная характеристика ПОУ, имеющая максимумы на частотах, кратных частоте межмодового интервала (рис. 5). Установлено, что система очень чувствительна к механическим воздействиям, которые приводят к изменению как потерь, так и поляризации света, распространяющегося в волокне. Поскольку при создании ПКЛ было использовано волокно,

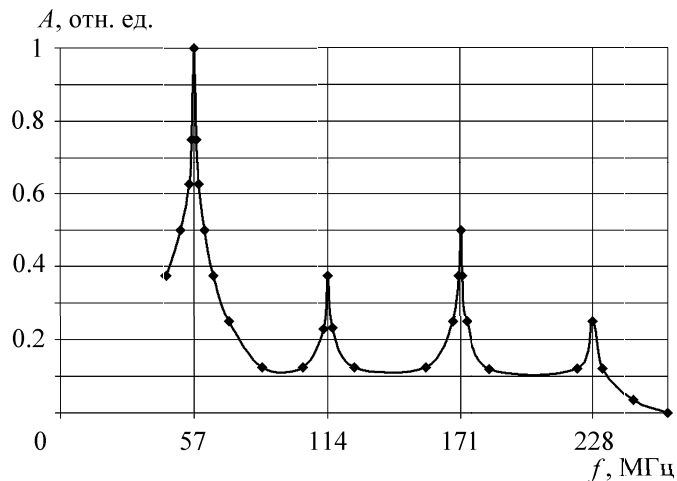


Рис. 5. Амплитудно-частотная характеристика кольцевого лазера

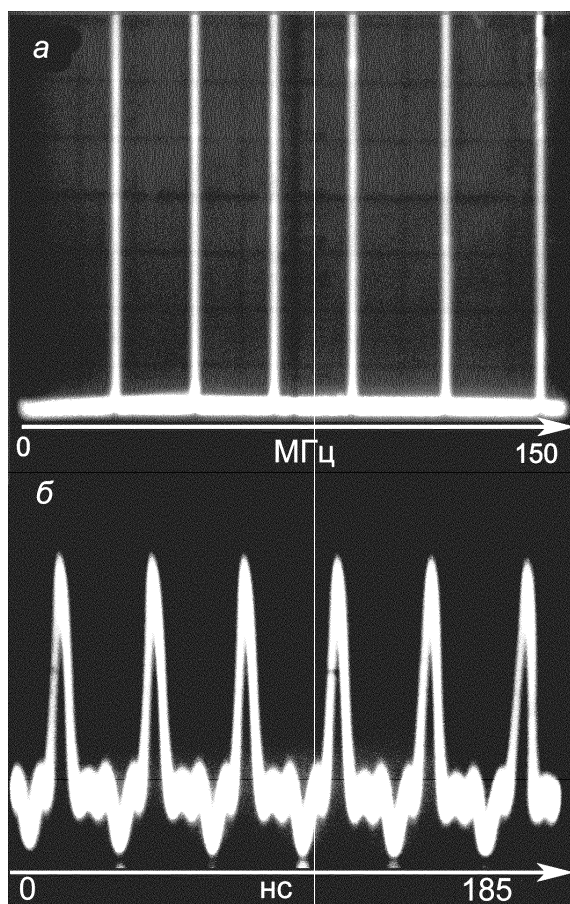


Рис. 6. Спектр межмодовых биений в режиме активной синхронизации мод (а) и зарегистрированные оптические импульсы в режиме активной синхронизации мод (б)

не сохраняющее поляризацию, при его деформации плоскость поляризации излучения изменялась и могла не совпадать с выделенным направлением поляризации в оптическом усилителе. Все это приводило к дополнительным потерям мощности излучения. Для компенсации этого эффекта в волоконный резонатор был включен контроллер поляризации. Экспериментально было установлено, что большая ширина линий биений связана с неконтролируемым взаимодействием встречных волн, возникающим в ре-

зультате обратного рассеяния на неоднородностях резонатора и их взаимодействием через активную среду. Для уменьшения влияния этих взаимодействий лазер был переведен в режим однонаправленной генерации путем подавления одной из встречных волн оптическим изолятором.

Использование оптического изолятора и контроллера поляризации существенно повысило стабильность работы ПКЛ. Об этом свидетельствуют данные рис. 6, а. По сравнению со спектром, получаемым без принятия дополнительных мер контроля параметров излучения (рис. 4), ширина линий на частотах межмодовых биений оказывается значительно уже и составляет менее 3 кГц. При этом амплитуда спектральных составляющих увеличилась более чем в 20 раз.

При использовании внешнего генератора гармонического сигнала, модулирующего ток накачки ПОУ, был достигнут режим активной синхронизации мод. При этом на экране осциллографа можно было наблюдать импульсы длительностью 4 нс, следующие с периодом повторения 37 нс (рис. 6, б). Период повторения импульса определяет частота межмодовых биений 27 МГц (длина резонатора 7.5 м). Длительность импульсов 4 нс была ограничена полосой пропускания осциллографа С1-75, составляющей 250 МГц.

Заключение

Экспериментально продемонстрирована возможность генерации коротких оптических импульсов с помощью кольцевого полупроводникового лазера при активной синхронизации мод кольцевого резонатора.

Литература

1. Liao Sh.-H., Wang Sh. // Appl. Phys. Lett. 1980. **36**. P. 801.
2. Привалов В.Е., Фридрихов С.А. // УФН. 1969. **97**, № 3. С. 377.
3. Шелаев А.Н. Динамика генерации и невязимые оптические эффекты в твердотельных кольцевых лазерах: Дис. ... д-ра физ.-мат. наук. М., 1997.
4. Войтович А.П., Калинов В.С., Смирнов А.Я. // ЖПС. 1984. **XLI**, № 1. С. 10.
5. Donati S., Giuliani G., Sorel M. // Alta Frequenza — Rivista di Elettronica. 1997. **9**, N 6. P. 61.
6. Sorel M., Laybourn P.J.R., Giuliani G., Donati S. // Alta Frequenza — Rivista di Elettronica. 1998. **10**, N 6. P. 45.
7. Taguchi K., Fukushima K., Ishitani A., Ikeda M. // Opt. and Quant. Electronics. 1999. **31**. P. 1219.
8. Yao X.S., Maleki L. // Opt. Lett. 1996. **21**, N 7. P. 483.
9. Yao X.S., Maleki L. // Opt. Lett. 1997. **22**, N 24. P. 1867.
10. Васильев П.П. Генерация инжекционными лазерами ультракоротких импульсов и их взаимодействие с полупроводниками: Дис. ... д-ра физ.-мат. наук. М., 1999.

Поступила в редакцию
04.05.05