

## Особенности режимов генерации полупроводникового лазера с внешним резонатором при СВЧ модуляции

А.А.Исакова, К.Н.Савинов, Н.Н.Головин, Н.Ж.Алтынбеков, В.И.Вишняков, А.К.Дмитриев

*При СВЧ модуляции тока накачки полупроводникового лазера ( $\lambda = 795$  нм) наблюдалась осциллирующая зависимость амплитуд боковых составляющих спектра излучения от частоты и найдена связь этих осцилляций со структурой поля в резонаторе лазера и оптической толщиной дифракционной решетки резонатора.*

**Ключевые слова:** рубидиевый стандарт частоты, полупроводниковый лазер, СВЧ накачка.

### 1. Введение

Работы по повышению стабильности квантовых стандартов частоты ведутся непрерывно с момента создания мазеров и лазеров [1]. В качестве реперов для квантовых стандартов частоты служат узкие спектральные резонансы как в оптическом, так и в СВЧ диапазоне. Погрешность воспроизведения лучшими стандартами частоты составляет  $\sim 10^{-16}$  [2, 3].

В течение последних десятилетий в качестве первичного принят цезиевый стандарт, частота которого составляет 9.192 ГГц. Все СВЧ стандарты (водородные или на щелочноземельных атомах) используют запрещенные переходы между подуровнями сверхтонкого расщепления основного состояния.

Сочетание двух основных состояний с общим возбужденным состоянием посредством двух когерентных излучений на частотах, совпадающих с двумя разрешенными оптическими переходами, приводит к эффектам интерференции в процессе возбуждения. Когда разность частот между световыми волнами равна частоте часового перехода, при наблюдении флуоресценции возникает провал. Это явление, предсказанное в работе [4], получило название когерентного пленения населенности (КПН). Практически сразу же КПН-резонансы были зарегистрированы в ячейке с атомами натрия [5]. Одним из основных применений КПН-резонансов стало их использование в качестве реперов для стандартов частоты [6]. Другие их применения связаны с магнитометрией [7, 8], индуцированной прозрачностью [9–11], охлаждением атомов [12] и прецизионной спектроскопией [13].

Наиболее массовыми в настоящее время являются рубидиевые часы, в первых образцах которых в качестве ис-

точника оптической накачки использовалась спектральная лампа с парами рубидия [14]. Как было показано в работе [15], минимальными сдвигами обладает сверхтонкий переход  $5S_{1/2} (F = 2) - 5S_{1/2} (F = 1)$  основного состояния  $D_1$ -линии изотопа рубидия-87 на длине волны 795 нм. Отличия в ширине и амплитуде резонансов КПН для линий поглощения  $D_1$  и  $D_2$  связаны с различием структуры магнитных подуровней возбужденного Р-состояния. Сравнение параметров резонансов КПН для атомов Rb показало, что использование линии  $D_1$  обеспечивает примерно в 10 раз более высокую интенсивность резонансов КПН, чем при использовании линии  $D_2$ .

В настоящее время для накачки рубидиевых часов широко используются лазеры с вертикальным резонатором, преимущество которых заключается в низком уровне потребления энергии и малых габаритных размерах [16, 17], что позволяет эффективно модулировать спектр излучения этого лазера в широком интервале сверхвысоких частот, в том числе и на частоте часового перехода.

Оптическая накачка КПН-резонансов в атомах рубидия с использованием одного лазера была осуществлена при синусоидальной модуляции тока инжекции лазерного диода на AlGaAs на длине волны излучения 780 нм [18]. При субгармонической частотной модуляции на 1.139 ГГц с индексом модуляции 4.2 на часовом переходе 6.834682613 ГГц был зарегистрирован резонанс шириной 3 кГц.

Вместе с тем, была продемонстрирована эффективная СВЧ накачка в полупроводниковом лазере на более высокой частоте, когда значение последней совпадает с межмодовым интервалом резонатора лазера [19]. Однако вопрос о необходимой точности согласования длины резонатора с частотой модуляции оставался открытым.

В настоящей работе приведены результаты исследований эффективности СВЧ накачки в полупроводниковом лазере с внешним резонатором на длине волны 795 нм в зависимости от частоты модуляции вблизи резонансного значения.

### 2. Экспериментальная установка

В работе использовался полупроводниковый лазер ECDL-7940RF (S/N 061332 VitaWave). Оптическая схема диодного лазера представлена на рис.1. На одну из сторон лазерного диода  $I$  было нанесено просветляющее по-

А.А.Исакова, К.Н.Савинов, Н.Н.Головин, Н.Ж.Алтынбеков. Новосибирский государственный технический университет, Россия, 630073 Новосибирск, просп. Маркса, 20; e-mail: alina100@mail.ru  
А.К.Дмитриев. Новосибирский государственный технический университет, Россия, 630073 Новосибирск, просп. Маркса, 20; Институт лазерной физики СО РАН, Россия, 630090 Новосибирск, просп. Акад. Лаврентьева, 13/3; e-mail: alexander\_dmitriev@ngs.ru  
В.И.Вишняков. Институт лазерной физики СО РАН, Россия, 630090 Новосибирск, просп. Акад. Лаврентьева, 13/3; e-mail: split7fire@yandex.ru

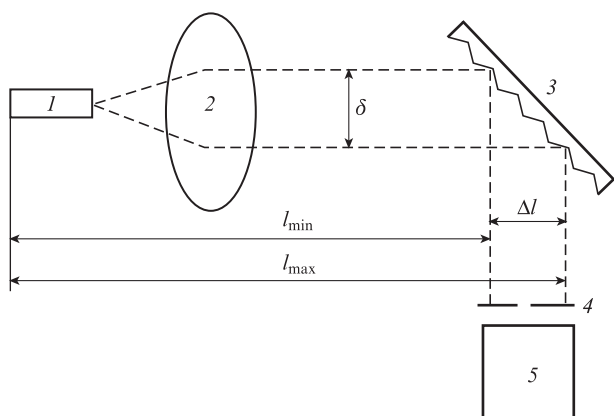


Рис.1. Оптическая схема диодного лазера: 1 – лазерный диод; 2 – асферическая линза; 3 – дифракционная решетка; 4 – диафрагма; 5 – фотодетектор;  $\delta$  – ширина светового пучка;  $l_{\max}$  и  $l_{\min}$  – максимально и минимально возможные длины резонатора лазера соответственно;  $\Delta l = l_{\max} - l_{\min}$  – оптическая толщина дифракционной решетки (неопределенность длины резонатора лазера).

крытие. Излучение лазера поступало на асферическую линзу 2, после которой световой пучок с апертурой  $\delta$  попадал на дифракционную решетку 3. Последняя устанавливалась таким образом, чтобы длина резонатора обеспечивала величину межмодового интервала лазера вблизи половины частоты часового перехода  $5S_{1/2}(F=2) - 5S_{1/2}(F=1)$  основного состояния  $D_1$ -линии изотопа рубидия-87. Оптическая толщина решетки (и обусловленная ею неопределенность длины резонатора лазера  $\Delta l$ ) связана с диаметром светового пучка  $\delta$  соотношением:  $\Delta l = \delta \operatorname{tg} \alpha$ , где  $\alpha$  – угол падения светового пучка на решетку. Поскольку в нашем случае дифракционная решетка (1800 штрих./мм) устанавливалась под углом, близким к  $45^\circ$ , оптическая толщина решетки практически определялась апертурой светового пучка, т. е.  $\Delta l = \delta$ .

Схема измерения спектра излучения лазера представлена на рис.2. Сигналы от блока питания постоянным током 1 и от СВЧ генератора SG384-SRS 3 через смеситель ZFBT-6GW-FT 2 поступали на диодный лазер 4. Излучение лазера через оптический изолятор 5 направлялось на интерферометр Фабри–Перо 6, который был образован плоскими зеркалами с пропусканием 5% и 40% для входного и выходного зеркала соответственно. Выходное зеркало крепилось на пьезокерамике 7, что позволяло сканировать расстояние между зеркалами интерферометра с помощью цифрового генератора пилообразного напряжения 9. Прощедшее через интерферометр излучение

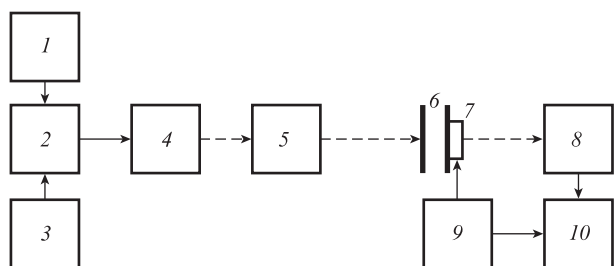


Рис.2. Схема измерений спектра излучения лазера: 1 – блок питания лазера; 2 – смеситель; 3 – СВЧ генератор; 4 – полупроводниковый лазер; 5 – оптический изолятор; 6 – интерферометр Фабри–Перо; 7 – пьезокерамика; 8 – фотодетектор; 9 – генератор пилообразного напряжения; 10 – цифровой осциллограф.

регистрировалось фотодетектором 8, сигнал с выхода которого поступал на цифровой осциллограф 10. Для синхронизации развертки осциллографа с перестройкой длины (частоты) интерферометра на его второй канал поступал сигнал от генератора пилообразного напряжения.

### 3. Экспериментальные результаты и их обсуждение

Измерения спектра проводились на длине волны 795 нм при токе накачки лазера 72 мА и сигнале от СВЧ генератора 16 дБм. В отсутствие модуляции лазер работал в одностороннем режиме с шириной линии излучения  $\sim 10^4$  Гц. Область свободной дисперсии интерферометра Фабри–Перо равна 20 ГГц, время развертки пилообразного напряжения составляло 0.1 с. Максимальное значение амплитуд боковых составляющих наблюдалось на частоте  $f_0 = 3.54$  ГГц (рис.3). Интенсивности центральной и боковых компонент нормированы на интенсивность сигнала в отсутствие модуляции. Поскольку резонансная частота модуляции  $f_0$  связана с оптической длиной резонатора  $l$  соотношением  $f_0 = c/2l_0$ , где  $c$  – скорость света, то соответствующая этой частоте эффективная длина резонатора лазера  $l_0$  составляла 42 мм. Амплитуда высокочастотной компоненты была меньше низкочастотной. Это, по-видимому, связано с тем, что наряду с частотной имела место также и амплитудная модуляция.

Для повышения достоверности экспериментальных данных было выполнено десять измерений зависимостей амплитуд боковых составляющих от частоты СВЧ генератора, вид которых имел осциллирующий характер (рис.4). Частота СВЧ генератора  $f$  изменялась дискретно с шагом 0.01 ГГц. Интервал между соседними максимумами составлял  $\sim 0.08$  ГГц, а полуширина основного лепестка в окрестности частоты  $f_0 = 3.54$  ГГц была 0.15 ГГц. Во всем диапазоне частот амплитуда низкочастотной компоненты была больше высокочастотной. Минимумы амплитуды несущей соответствовали максимумам боковых компонент. Как и следовало ожидать, суммарная интенсивность боковых составляющих спектра и несущей в пределах погрешности измерений была равна интенсивности излучения лазера в отсутствие модуляции. Диапазон частот, в котором наблюдались боковые составляющие, лежал в интервале  $\Delta f = 0.3 \pm 0.03$  ГГц, относительная ширина которого была равна  $\Delta f/f_0 = 0.085 \pm 0.01$ .

Для определения оптической толщины дифракционной решетки и выяснения причин осциллирующей амплитуды

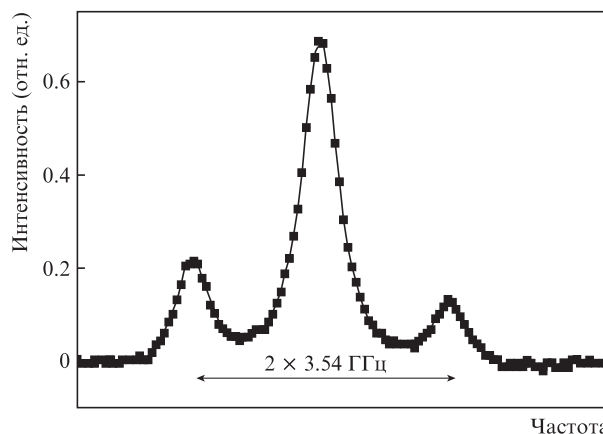


Рис.3. Спектр излучения лазера при частоте накачки  $f_0 = 3.54$  ГГц.

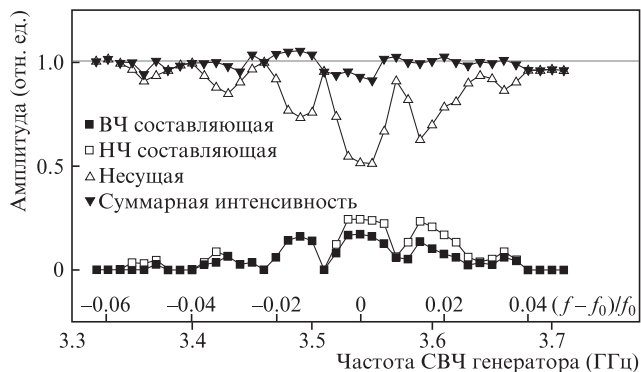


Рис.4. Зависимости амплитуд боковых составляющих, несущей и суммарной интенсивности от частоты модуляции.

боковых составляющих спектра излучения лазера в зависимости от частоты модуляции измерялись распределения интенсивности излучения лазера (см. рис.1) при по-

мощи фотодетектора с укрепленной на нем диафрагмой диаметром 0.206 мм. Фотодетектор устанавливался на двухкоординатном столике, управляемом шаговыми двигателями. Записи распределения интенсивности светового пучка на различных расстояниях от дифракционной решетки осуществлялись с шагом 0.2 мм как по горизонтальной ( $x$ ), так и по вертикальной ( $y$ ) координате (рис.5). Для каждого расстояния было проведено по 10 измерений и в результате статистической обработки данных получены профили сечения с учетом среднеквадратичного отклонения.

На выходе лазера (рис.5,*a*) распределение интенсивности излучения имеет форму, близкую к эллиптической; распределения в горизонтальной и вертикальной плоскостях (сечениях) по форме близки к гауссовым. Ширина светового пучка в горизонтальной плоскости и, следовательно, оптическая толщина дифракционной решетки составили  $\sim 3.3 \pm 0.3$  мм, что дает отношение  $\Delta/l_0 = 0.08 \pm 0.008$ . Это значение совпадает с полученной выше относитель-

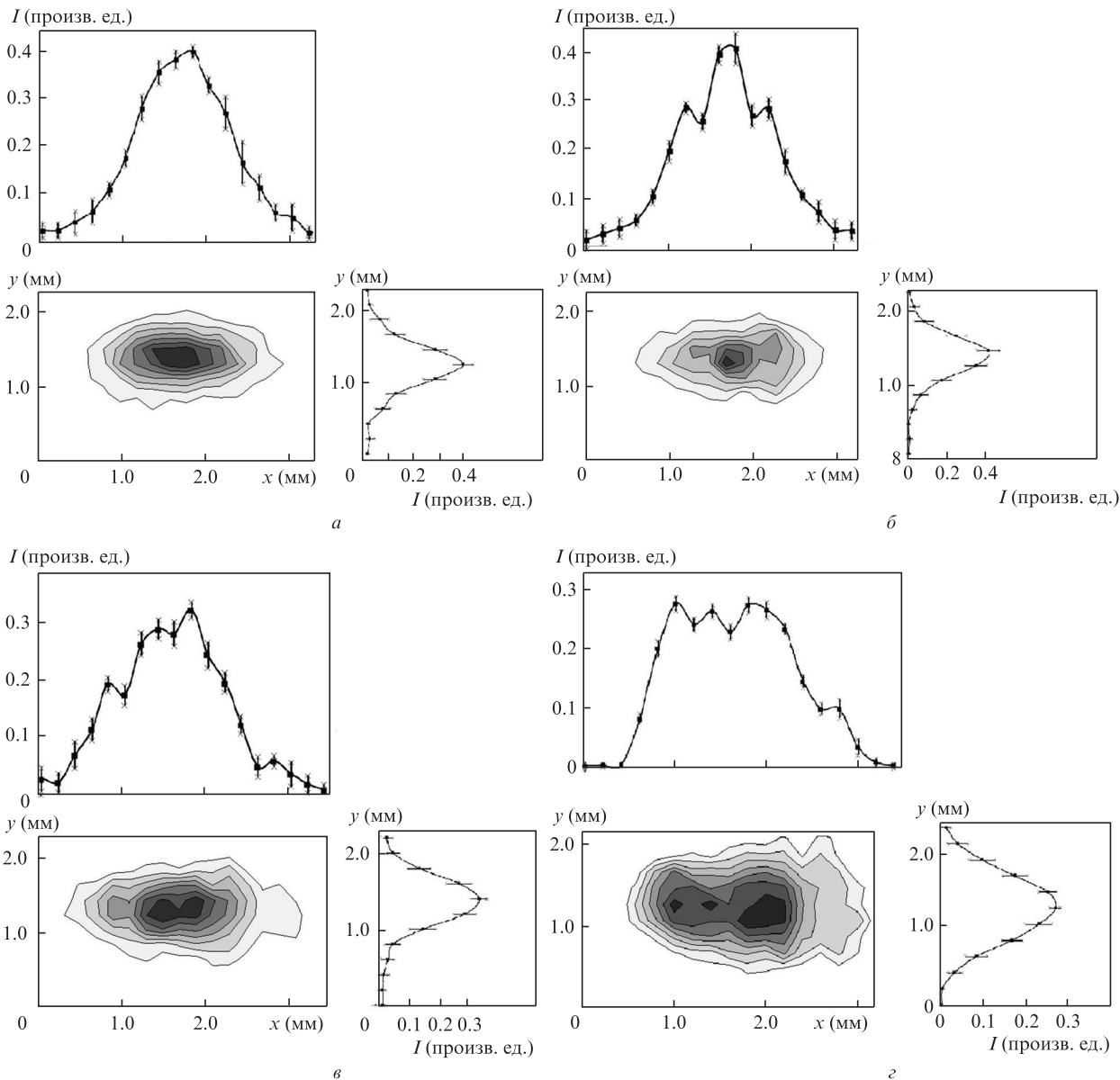


Рис.5. Распределение интенсивности излучения лазера в сечениях на расстояниях от дифракционной решетки: 12 (*a*), 211 (*б*), 428 (*в*) и 898 мм (*г*). Большее значение по оси  $x$  соответствует большей длине резонатора. При построении топограмм величина интенсивности делилась на восемь зон от нулевого до максимального уровня. Максимальному уровню интенсивности соответствует черный цвет.

ной шириной диапазона частот, в котором наблюдались боковые составляющие  $\Delta f/f_0 = 0.085 \pm 0.01$ . Таким образом, можно утверждать, что диапазон эффективных модулирующих сверхвысоких частот определяется оптической толщиной дифракционной решетки.

Вместе с тем, гладкое распределение интенсивности излучения на выходе лазера не объясняет причины возникновения осцилляций (рис.4). Для выяснения природы осцилляций были исследованы профили распределения интенсивности излучения лазера на различных расстояниях от дифракционной решетки. С увеличением расстояния в горизонтальном профиле распределения интенсивности излучения появляется фрагментация. При расстоянии 898 мм от дифракционной решетки (рис.5,з) форма сечения качественно совпадает с формой зависимости амплитуд боковых компонент от частоты модуляции (рис.4). Следует отметить, что большей длине соответствует меньшая частота. Фрагментация профилей сечения связана со структурированностью (осциллирующей зависимостью) волнового фронта в горизонтальной плоскости на дифракционной решетке резонатора лазера. Последнее, в свою очередь, может быть обусловлено сложным составным резонатором и дефектами дифракционной решетки.

Итак, в работе наблюдалась осциллирующая зависимость амплитуд боковых составляющих от частоты СВЧ сигнала. Такая зависимость, по-видимому, обусловлена использованием сложного составного резонатора лазера. Диапазон частот, в котором наблюдались боковые составляющие, составил 0.3 ГГц, а полуширина основного лепестка в окрестности частоты  $f_0 = 3.54$  ГГц была равна 0.15 ГГц. Это означает, что для эффективной модуляции на частоте вблизи половины частоты часового перехода (3.42 ГГц) эффективная длина резонатора лазера должна быть выставлена на уровне 44 мм с относительной погрешностью не более 0.04.

Работа выполнена при финансовой поддержке Минобрнауки РФ (грант № 3.6835.2017/8.9) в рамках базовой части государственного задания и РФФИ (грант № 15-02-02557).

1. Quinn T. (Ed). *Metrologia*, **42** (3), S1–S153 (2005).
2. Bize S., Laurent P., Abgrall M., Marion H., Maksimovic I., Cacciapuoti L., Grunert J., Vian C., Pereira dos Santos F., Rosenbusch P., Lemonde P., Santarelli G., Wolf P., Clairon A., Luiten A., Tobar M., Salomon C. *J. Phys. B: At. Mol. Opt. Phys.*, **38**, 449 (2005).
3. Hollberg L., Oates C.W., Wilpers G., Hoyt C.W., Barber Z.W., Diddams S.A., Oskay W.H., Bergquist J.C. *J. Phys. B: At. Mol. Opt. Phys.*, **38**, 469 (2005).
4. Arimondo E., Orriols G. *Lettere Al Nuovo Cimento*, **17**, 333 (1976).
5. Alzetta G., Gozzini A., Moi M., Orriols G. *Il Nuovo Cimento*, **36**, 5 (1976).
6. Vanier J. *Appl. Phys. B*, **81**, 421 (2005).
7. Scully O., Fleischhauer M. *Phys. Rev. Lett.*, **69**, 1360 (1992).
8. Nagel A., Graf L., Naumov A., Mariotti E., Biancalana V., Meschede D., Wynands R. *Europhys. Lett.*, **44**, 31 (1998).
9. Harris E. *Phys. Today*, **50**, 36 (1997).
10. Kasapi A., Jain M., Yin G.Y., Harris S.E. *Phys. Rev. Lett.*, **74**, 2447 (1995).
11. Scully M.O., Zubairy M.S. *Quantum Opt.*, **67**, 648(1999).
12. Aspect A., Arimondo E., Kaiser R., Vansteenkiste N., Cohen-Tannoudji C. *J. Opt. Soc. Am. B*, **6**, 2112 (1989).
13. Wynands R., Nagel A. *Appl. Phys. B*, **68**, 1 (1999).
14. Bell W.E., Bloom A.L. *Phys. Rev. Lett.*, **6**, 280 (1961).
15. Stähler M., Wynands R., Knappe S., Kitching J., Hollberg L., Taichenachev A., Yudin V. *Opt. Lett.*, **27**, 1472 (2002).
16. Vanier J., Levine M., Kendig S., Janssen D., Everson C., Delaney M. in *Proc. IEEE Int. Ultrasonics, Ferroelectrics, Frequency Control Joint 50th Anniversary Conf.* (New York: IEEE, 2004, p.92).
17. Хрипунов С.А., Раднатаров Д.А., Кобцев С.М., Юдин В.И., Тайченачев А.В., Басалаев М.Ю. и др. *Квантовая электроника*, **46**, 668 (2016) [*Quantum Electron.*, **46**, 668 (2016)].
18. Cyr N., Têtu M., Breton M. *IEEE Trans. Instrum. Meas.*, **42**, 640 (1993).
19. Багаев С.Н., Волков В.Г., Ивашко Д.Ю., Матюгин Ю.А., Фатеев Н.В. *Квантовая электроника*, **26**, 109 (1999) [*Quantum Electron.*, **29**, 109 (1999)].