

Ю. А. Быковский, В. Л. Величанский, И. Г. Гончаров, А. П. Грачев, А. С. Зибров,
С. И. Коваль, Г. Т. Пак

ПЕРЕСТРОЕЧНЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ИНЖЕКЦИОННОГО ЛАЗЕРА С КОРОТКИМ ВНЕШНИМ ДИСПЕРСИОННЫМ РЕЗОНАТОРОМ

При изменении длины внешнего резонатора получена непрерывная перестройка частоты в диапазоне 60 ГГц, что превышает его межмодовый интервал (21 ГГц) в три раза. Это явление объясняется зависимостью показателя преломления от концентрации электронов. Достигнутая ширина линии не превышает 6 МГц.

Несмотря на постоянное совершенствование инжекционных лазеров с традиционным резонатором, образованным сколотыми гранями кристалла, внешняя оптическая связь (ОС) продолжает привлекать внимание исследователей. Усложнение лазера и его эксплуатации при использовании внешних оптических элементов окупается сужением линии генерации [1], увеличением диапазона перестройки частоты [2, 3], повышением стабильности спектра в режиме модуляции тока [4]. В последнее время для согласования активной области лазера с внешним резонатором (ВР) все чаще применяются элементы волоконной оптики: граданы [5, 6] и шариковые линзы [7, 8]. Уступая объективам микроскопов по достижимому уровню связи, эти элементы обладают определенными достоинствами: возможностью массового производства, дешевизной и компактностью (длина ВР может быть доведена до нескольких миллиметров). В настоящей работе согласование велось помошью шариковой линзы (сапфировый шарик диаметром 2 мм). Это позволило провести исследования с внешним дисперсионным резонатором для сравнительно малоизученной области параметра $L_{\text{вр}}/n^*l \approx 10$, где $L_{\text{вр}}$ — длина внешней пассивной части резонатора, n^*l — оптическая длина лазерного диода (ЛД).

В качестве активных элементов использовались полосковые лазеры на основе двойных гетероструктур AlGaAs/GaAs с шириной полоски 10 мкм и длиной резонатора 250—280 мкм (рис. 1). Коэффициент отражения одного из зеркал лазера был уменьшен до 2—4 % нанесением просветляющего покрытия. Лазеры работали в непрерывном режиме при комнатной температуре в спектральной области 0,86 мкм. Пороговые токи в отсутствие внешней ОС составляли 130—180 мА. Внешним селективным зеркалом служила плоская отражательная дифракционная решетка с плотностью штрихов 600 мм^{-1} . Она устанавливалась со стороны просветленной грани лазера в автоколлимационной схеме во втором порядке дифракции. Использование в плече ВР шариковой линзы позволяло менять его оптическую длину (в дальнейшем под длиной ВР будем подразумевать его оптическую длину) от 7 мм — расстояния, на которое удавалось приближать дифракционную решетку к грани лазера с учетом коэффициента преломления шариковой линзы ($n=1,76$) до 5 см (при больших длинах одночастотная генерация не наблюдалась). Селективные свойства такого резонатора обеспечивали в указанном диапазоне длин генерацию на одной продольной mode составного резонатора (СР).

Спектральный состав излучения исследовался с помощью монохроматора МДР-23 и кварцевого эталона Фабри — Перо. Для обзорного наблюдения спектра и контроля уровня мощности в соседних модах лазера на выходе монохроматора устанавливался специальный щелевой фотоприемник, расположенный на электромеханическом вибраторе. Таким фотоприемником служил полупроводниковый лазер на четверном соединении InGaPAs с приемной площадкой 1×4 мкм, включенный в вентильном режиме. Спектр лазера наблюдался в реальном масштабе времени с разрешением не хуже 0,1 нм в диапазоне до 2 нм. Для оценки ширины линии излучения использовался сканирующий конфокальный интерферометр Фабри — Перо с базой 30 см (на рис. 1 не показан). Мощность излучения регистрировалась калиброванным фотодиодом ФД-24К. Ниже приводятся характерные зависимости для

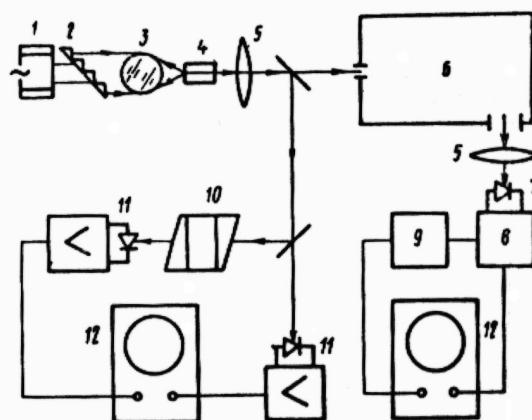


Рис. 1. Схема установки:

1 — пьезокерамика; 2 — дифракционная решетка; 3 — шариковая линза; 4 — инжекционный лазер; 5 — микрообъектив; 6 — монохроматор; 7 — щелевой фотоприемник; 8 — вибратор; 9 — блок питания вибратора; 10 — контрольный эталон Фабри—Перо; 11 — фотоприемник; 12 — осциллограф

одного из образцов (аналогичные зависимости наблюдались и на других образцах).

Спектр лазера в отсутствие внешней ОС в режиме генерации был много-модовым. Пороговый ток составлял 174 мА. С увеличением тока моды лазера смещались в длинноволновую сторону спектра со скоростью 4 ГГц/мА. Относительное уменьшение порогового тока для данного образца при включении внешней ОС и настройке решетки на центр линии усиления составило 4 %. При этом в спектре происходило выделение одной из продольных мод СР. Поворотом решетки удавалось перестраивать частоту генерации по продольным резонансам ЛД в диапазоне 5 нм по уровню 1/2 от максимальной мощности излучения. Ширина линии генерации при настройке на центр линии усиления и мощности излучения 5 мВт была не более 6 МГц, что соответствует спектральному разрешению интерферометра.

На рис. 2 показаны ватт-амперные характеристики лазера при $L_{\text{вр}} \approx 10$ мм для двух соотношений длин плеч СР, полученные при модуляции тока накачки по пилообразному закону со скоростью 3 мА/мс и частотой 50 Гц. Видно, что с изменением тока уровень мощности меняется скачкообразно в обоих случаях. На рис. 2, а, который получен при кратном соотношении длин плеч СР, мощность излучения между двумя последовательными скачками меняется монотонно. На рис. 2, б, соответствующем некратным длинам плеч резонатора, вблизи вершины перестроенной кривой имеются участки немонотонного изменения мощности. Контроль (с разрешением примерно 0,1 нм) за усредненным по времени спектром излучения при модуляции тока накачки показал, что ватт-амперной характеристике на рис. 2, б отвечает спектр, состоящий из двух соседних мод ЛД, в то время как на рис. 2, а динамический спектр лазера остается одномодовым (в смысле продольных мод ЛД). В обоих случаях в каждый момент времени генерация происходит на одной моде СР. Любой скачок мощности обусловлен переключением генерации с одной моды СР на другую.

На рис. 2, а с ростом тока спектральные скачки происходят в окрестности одного резонанса ЛД между соседними модами составного резонатора в длинноволновую сторону спектра (и наоборот — при убывании тока), что связано с токовым смещением резонансов ЛД при изменении тока [9]. При этом на всем участке монотонного изменения мощности излучения между двумя последовательными скачками генерация осуществляется на одной моде СР с фиксиру-

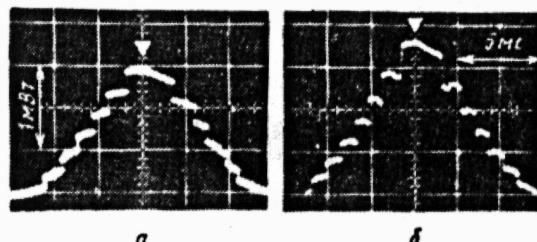


Рис. 2. Ватт-амперные характеристики лазера при различном отношении $m = L_{\text{вр}}^*/n^*l:m = 8,0$ (а) и 8,5 (б); стрелками показаны моменты времени, начиная с которых нараставший ток начинает убывать

ванным индексом. Нарушение условия кратности на немонотонных участках перестроичной кривой между ближайшими скачками мощности вызывает переключение генерации с моды СР, расположенной вблизи максимума одного из резонансов лазерного диода, на другую моду СР, находящуюся в окрестности максимума соседнего резонанса ЛД (также попадающего в контур внешней обратной связи в условиях невысокой селективности ВР), так как она оказывается добротнее той моды, на которой до этого происходила генерация.

При дальнейшем увеличении тока добротность моды СР, расположенной вблизи максимума предыдущего резонанса ЛД, оказывается выше, и на нее происходит переключение генерации, сопровождающееся скачком ощности. Эта мода оказывается соседней по отношению к моде СР, на которой первоначально происходила генерация, и имеет большую длину волны вследствие смещения резонансов ЛД. В лазерах с внешним неселективным зеркалом этот эффект приводит к удвоению, утроению и т. д. числа переключений генерации внутри перестроичного цикла при соответствующих условиях кратности [10, 11]. На обеих осциллограммах рис. 2 заметен также гистерезис, проявляющийся в сдвиге моментов переключения генерации по модам СР при уменьшении тока [12].

Частотная перестройка при постоянном токе осуществлялась также изменением длины ВР. Для этой цели на пьезокерамику, где размещена дифракционная решетка, подавалось синусоидальное напряжение частотой 50 Гц. На рис. 3 приведены перестроичные характеристики лазера для трех различных уровней ОС. На рис. 3, а видна характерная пилообразная зависимость мощности излучения от длины ВР с периодом, равным половине длины волны генерации [13]. На возрастающем участке пилы (между двумя соседними скачками) с ростом длины ВР длина волны излучения увеличивается. Каждому скачку мощности соответствует переключение генерации на соседнюю коротковолновую моду СР. На спадающих участках пилы при обратном ходе пьезокерамики длина волны уменьшается, а переключение происходит на длинноволновую моду. Экстремумам этой кривой соответствуют точки поворота пьезокерамики (стрелки). Верхняя кривая показывает пропускание измерительного эталона Фабри — Перо с областью свободной дисперсии 5 ГГц. По ней можно следить за диапазоном перестройки частоты. При $L_{\text{вр}} = 10$ мм диапазон перестройки совпал с межмодовым интервалом ВР, равным 15 ГГц.

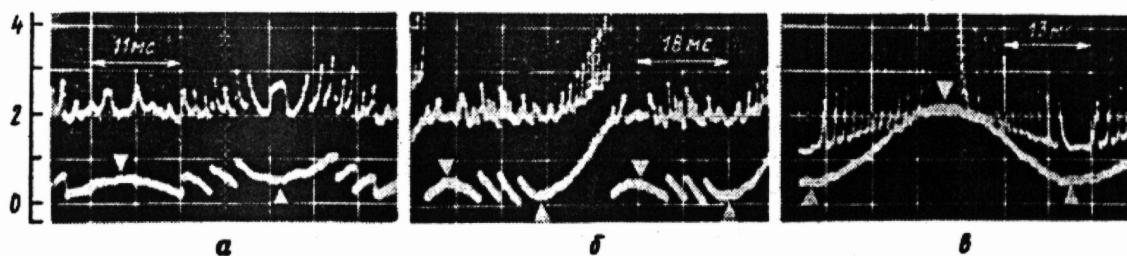


Рис. 3. Перестроичные характеристики лазера при различных уровнях связи:
нижняя кривая — сигнал с фотоприемника, детектирующего излучение; верхняя — пики пропускания контрольного эталона Фабри — Перо; стрелки — точки поворота пьезокерамики. Длина внешнего резонатора меняется по гармоническому закону в окрестности 10 (а) и 7 мм (б, в).

С увеличением уровня ОС путем оптимизации настройки СР в перестроичной кривой появлялись особенности. Область монотонного увеличения мощности возрастила, и диапазон непрерывной перестройки частоты, отвечающей этой области, начинал превосходить межмодовый интервал ВР. На полупериоде движения пьезокерамики, когда длина ВР уменьшалась, ничего подобного не происходило. Этот случай, показанный на рис. 3, б, получен при $L_{\text{вр}} = 7$ мм. Видно, что диапазон непрерывной перестройки частоты составляет примерно 50 ГГц. На рис. 3, в представлена аналогичная осциллограмма при той же длине, но большем уровне связи, когда относительная глубина модуляции мощности при изменении длины ВР составляла 50 %. Непрерывная перестройка частоты в этом случае происходит во всей области изменения длины

ВР в диапазоне 60 ГГц, что соответствует примерно трем межмодовым интервалам ВР.

Описанный ффект, рассмотренный ранее в [14] (там при большой длине внешней части резонатора абсолютная величина затягивания была существенно меньше), имеет простое объяснение, которое основано на зависимости показателя преломления активной среды лазера от интенсивности излучения, приводящей к ряду нелинейных явлений [15]. С ростом $L_{\text{вр}}$ моды составного резонатора смещаются в длинноволновую сторону спектра. Смещение генерирующей моды по коротковолновому склону спирального контура селективной ОС в сторону минимума потерь приводит к росту интенсивности излучения. Уменьшение интенсивности с ростом длины ВР при ана огичном движении мод СР вдоль длинноволнового склона контура экспериментально не наблюдалось из-за неустойчивости генерации на этом склоне. С ростом интенсивности (при снижении потерь концентрация свободных носителей уменьшается) показатель преломления увеличивается, растет оптическая длина ЛД и, как следствие, его резонансы смещаются в ту же сторону спектра, что и моды СР. Можно, по-видимому, считать, что в моменты переключений генерации максимум продольного резонанса ЛД, в окрестности которого осуществляется генерация, равнотстоит на спиральной оси от двух соседних мод СР, так как их добротности в этом случае практически равны. Следовательно, движение мод СР и резонансов ЛД в общем направлении (в длинноволновую сторону при увеличении $L_{\text{вр}}$) приводит к запаздыванию моментов переключений относительно тех, что имели бы место в случае постоянства оптической длины лазера. Этим и объясняется увеличение диапазона перестройки частоты. На рис. 3, в этот диапазон ограничен способностью пьезокерамики менять длину ВР, чем и обусловлен симметричный вид перестроенной кривой.

В момент спирального переключения происходит скачок мощности излучения и спиральный скачок резонансов ЛД. Этим объясняется возможность переключения генерации с данной моды СР не на соседнюю коротковолновую моду (что наблюдалось и при других настройках, но неизменном отношении диапазона непрерывной перестройки частоты к межмодовому интервалу ВР), а через несколько промежуточных мод на «невозмущенную» эффектом «затягивания» моду СР. В этом состоит отличие полученного результата от результатов, опубликованных в [14], где рассмотренная «затяжка» в областях гистерезисов перестроенной кривой сопровождается срывом на соседнюю моду ВР.

В заключение отметим, что использование шариковой линзы и стандартной дифракционной решетки в исследованной схеме позволит создать перестраиваемый лазер с ВР в виде малогабаритного модуля (порядка размеров элемента Пельтье) с термостабилизацией.

1. В. Л. Величанский, А. С. Зибров, В. В. Каргапольцев и др. *Письма в ЖТФ*, 4, 1087 (1978).
2. А. П. Богатов, Ю. В. Гуров, П. Г. Елисеев и др. *Квантовая электроника*, 6, 1264 (1979).
3. F. Favre, B. Le Guen et al. *Electron. Letts*, 22, 795 (1986).
4. K. Y. Lion. *Electron. Letts*, 19, 750 (1983).
5. G. Wenke, E. Patzak, P. Meissner. *Electron. Letts*, 22, 206 (1986).
6. J. Wittmann, G. Gaukel. *Electron. Letts*, 23, 524 (1987).
7. R. S. Vodhanel, J.-S. Ko. *Electron. Letts*, 20, 973 (1984).
8. И. Г. Гончаров, А. П. Грачев, К. Б. Дедушенко и др. *Квантовая электроника*, 12, 397 (1985).
9. В. И. Малахова, И. А. Рачков, Н. В. Сенков, С. Д. Якубович. *Квантовая электроника*, 13, 606 (1986).
10. N. Ogasawara, R. Ito, T. Sasaki, I. Osada. *Japan J. Appl. Phys.*, 21, 1465 (1982).
11. И. Г. Гончаров, А. П. Грачев, К. Б. Дедушенко и др. *Квантовая электроника*, 10, 1019 (1983).
12. R. Lang, K. Kobayashi. *IEEE J. QE-18*, 347 (1980).
13. G. A. Acket, D. Lenstra, A. J. Den Boef, B. H. Verbeek. *IEEE J. QE-20*, 1163 (1984).
14. В. Л. Величанский, А. С. Зибров, В. И. Молочев и др. *Квантовая электроника*, 8, 1925 (1981).
15. А. П. Богатов, П. Г. Елисеев. *Квантовая электроника*, 12, 465 (1985).

Московский инженерно-
физический институт

Поступила в редакцию
25 марта 1988 г.

Yu. A. Bykovskii, V. L. Velichanskii, I. G. Goncharov, A. P. Grachev,
A. S. Zibrov, S. I. Koval', G. T. Pak. Tuning Characteristics of an Injection Laser With
the External Dispersive Cavity of Small Length.