

МЕТОДИЧЕСКИЕ МАТЕРИАЛЫ

УДК 535.412.5

К ВОПРОСУ О КОГЕРЕНТНЫХ СВОЙСТВАХ ЛАЗЕРНЫХ ИСТОЧНИКОВ В ИНТЕРФЕРОМЕТРИИ И ГОЛОГРАФИИ

© 2012 г. А. В. Лукин, доктор техн. наук

НПО “Государственный институт прикладной оптики”, Казань

E-mail: npogipo@tnpko.ru

Продemonстрирован характер зависимости степени временной когерентности излучения газоразрядных и полупроводниковых лазеров от разрядного тока (тока накачки) и дифракционных потерь. Представлены экспериментальные результаты, полученные с помощью эталона Фабри–Перо и неравноплечего интерферометра Майкельсона с дифракционной решеткой.

Ключевые слова: когерентность, интерферометрия, голография, видность интерференционных полос.

Коды OCIS: 120.3180.

Поступила в редакцию 30.01.2012.

1. Введение

Работы по лазерной тематике в ГИПО были начаты в первой половине 1960-х годов под руководством Камиля Сабировича Мустафина – высококлассного специалиста в области физики плазмы и спектроскопии. Были созданы уникальные стенды и установки: стенд и аппаратура для измерения функции распределения электронов по скоростям в плазме тлеющего разряда на основе использования зондовой методики [1], импульсный лазер при высоких давлениях [2], установка для исследования особенностей плазмы в области отрицательного свечения тлеющего разряда [3] и др. Результаты этих работ явились базой для разработки в ГИПО первых газовых лазеров.

В те годы ГИПО был филиалом Государственного оптического института им. С.И. Вавилова и ведущие специалисты ГОИ оказывали нам шефскую помощь. Так, лазерное направление ГИПО курировала Инна Михайловна Белоусова, а голографическую тематику – Юрий Николаевич Денисюк.

В 1964 году в ГИПО была получена генерация в смеси He–Ne на длинах волн 1,15 мкм и 632,8 нм в резонаторе с двумя плоскими зеркалами. В 1966 году талантливым инженером-лазерщиком Геннадием Николаевичем Буйновым (с весьма скромным ассистирующим участием автора этой статьи) был разработан He–Ne-лазер с активным элементом в виде двух

оптически связанных параллельных разрядных трубок каждая длиной 1500 мм. Была достигнута рекордная по тому времени в СССР мощность 60 мВт в непрерывном одномодовом режиме¹ на длине волны 632,8 нм. В дальнейшем такие “самодельные” лазеры были использованы на начальных этапах работ в ГИПО по лазерно-голографической интерферометрии [4, 5].

Позднее в Рязани было образовано ПО “Плазма”, где была организована разработка и налажен серийный выпуск широкой номенклатуры газовых лазеров, которые до сих пор широко используются в отечественной науке и технике.

В данной статье представлены результаты экспериментальных исследований одной из важнейших характеристик лазерного излучения – временной когерентности.

2. Видность интерференционных полос и временная когерентность лазерного излучения

Видность полос двухлучевой интерференционной картины (V) в случае лазерного источника излучения при равенстве интенсивно-

¹ В технической литературе под термином “одномодовый” режим, как правило, подразумевается генерация нескольких продольных мод (TEM_{00q}), а случай истинно одномодового, т. е. одночастотного, режима оговаривается особо (см., напр., “Лазерные источники излучения”. Каталог-справочник. Изд. 8-е. Часть 1. “Газовые лазеры и лазеры на красителях”, М.: Изд. НТИУЦ ЛАС, 2006. С. 6–56.).

стей интерферирующих пучков ($J_1 = J_2$), как известно [6, 7], определяется модулем степени временной когерентности $\gamma_{12}(\tau)$:

$$V = \frac{J_{\max} - J_{\min}}{J_{\max} + J_{\min}} = \frac{2\sqrt{J_1 J_2}}{J_1 + J_2} |\gamma_{12}(\tau)| = \frac{\sin\left(N \frac{\pi c \tau}{2nD_R}\right)}{N \sin\left(\frac{\pi c \tau}{2nD_R}\right)}, \quad (1)$$

где J_{\max} и J_{\min} – максимальное и минимальное значения интенсивности в интерференционной картине, N – число типов колебаний, τ – время запаздывания одного пучка относительно другого, c – скорость света в вакууме, D_R – геометрическая длина резонатора, n – показатель преломления активной среды (в газовых лазерах $n \approx 1$). При этом оптическая разность хода интерферирующих пучков определяется как $\Delta L = c\tau$.

Из (1) следует, что при разности хода, кратной удвоенной оптической длине резонатора ($\Delta L = 2knD_R$, где $k = 0, \pm 1, \pm 2, \pm 3, \dots$), функция $|\gamma_{12}(\tau)|$ принимает максимальные значения, равные единице, а в промежутках между ними может осциллировать, проходя через вторичные максимумы, количество и амплитуды которых определяются числом N . В случае $N = 2$ имеется всего один минимум между двумя соседними максимумами, а вторичные максимумы отсутствуют. При этом положение минимумов определяется из условия $\Delta L_{\min} = (2k + 1)nD_R$.

Ниже приведены результаты исследований временной когерентности типичных газоразрядного и полупроводникового лазеров.

3. Газоразрядный лазер

Было исследовано влияние на функцию $V(\Delta L)$ режимов работы многомодового He–Ne-лазера типа ЛГ-75 (“Плазма”). С этой целью внутри резонатора была установлена ирисовая диафрагма с переменным диаметром 0,7–10 мм, что вместе с изменением разрядного тока позволило перестраивать в широких пределах модовый состав генерации.

Измерительная схема, собранная на основе интерферометра Майкельсона, обеспечила варьирование ΔL от –500 мм до +2300 мм. Регистрация распределения интенсивности в полосах интерференционной картины производилась с помощью фотоэлектронного умножителя ФЭУ-38 с диафрагмой, размер которой был

много меньше периода интерференционных полос.

Фототок регистрировался многопредельным микроамперметром типа М 95. Сканирование осуществлялось путем поворота плоскопараллельной кварцевой пластинки толщиной 20 мм, установленной перед диафрагмой².

Одновременно с измерением функции видности $V(\Delta L)$ с помощью эталона Фабри–Перо с базой 120 мм контролировался и спектральный состав лазерного излучения. Область дисперсии эталона примерно 1300 МГц, аппаратная ширина порядка 10 МГц. Его детали были изготовлены из инвара, одно из плоских диэлектрических зеркал имело “тонкие” юстировочные угловые подвижки в двух взаимно перпендикулярных направлениях (приблизительно 0,1”).

На рис. 1 представлена зависимость видности интерференционных полос V от разности хода ΔL для случаев, когда “модернизированный” лазер ЛГ-75 ($D_R = 1030$ мм, $\lambda = 632,8$ нм) генерировал одну (крестики) и четыре (кружочки) частоты. Здесь же приведены графики (сплошные линии) соответствующих функций $|\gamma_{12}(\Delta L)|$.

Видно, что расчет и эксперимент удовлетворительно согласуются, причем главный максимум для $N = 4$ имеет полуширину примерно 650 мм. Имеющиеся различия можно объяснить некоторой нестабильностью работы лазера в процессе измерений, а также тем, что формула (1) получена в предположении равенства амплитуд всех N продольных мод лазерного излучения. Последнее, как известно [7], не вполне оправдано, что видно и из рис. 2, на котором представлены образцы интерферограмм, полученных с помощью упомянутого выше эталона Фабри–Перо при генерации одной, четырех и восьми продольных мод, а также при генерации нескольких поперечных мод многомодового режима. При этом распределение амплитуд модовой структуры определяется формой доплеровского контура спектральной линии, полуширина которой в газоразрядной плазме He–Ne-лазера составляет около 1500 МГц [8, 9].

Из данных рис. 1 и 2 следует, что такой лазер в режиме четырех продольных мод может

² Эксперимент по измерению $V(\Delta L)$ (рис. 1) был выполнен 13–15 ноября 1967 года совместно с Г.Н. Буйновым на хорошо виброизолированной установке в подвальной помещении корпуса “Ш” ГИПО в ночное время.

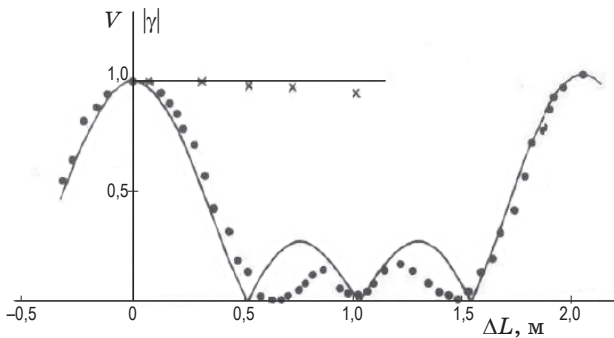


Рис. 1. Зависимость видности интерференционных полос V от разности хода ΔL для одночастотной (крестики) и четырехчастотной (кружочки) генерации. Сплошные линии – расчет функции $|\gamma_{12}(\Delta L)|$ по формуле (1).

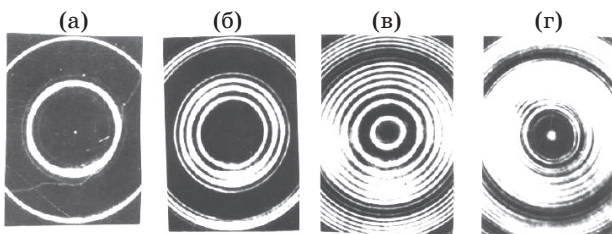


Рис. 2. Интерферограммы Фабри–Перо при одно- (а), четырех- (б), восьмичастотном (в) и многомодовом (г) режимах работы лазера.

быть использован и в большинстве голографических экспериментов, и в измерительных интерферометрах с допустимой разностью хода интерферирующих пучков до 200 мм. При этом видность полос в интерференционной картине не опустится ниже 0,9.

Были выполнены также исследования спектрального состава лазерного излучения методом гетеродинного детектирования [9]. В режиме генерации ТЕМ_{00q} (на нескольких продольных модах) лазер излучает несколько резонансных частот, причем интервал между ними $\Delta\nu$, как известно (см., напр., [8]), определяется соотношением

$$\Delta\nu = \frac{c}{2nD_R}. \quad (2)$$

С этой целью лазер ЛГ-75 с помощью упомянутой выше ирисовой диаграммы и регулировки разрядного тока настраивался на режим генерации нескольких продольных мод. Параллельный лазерный пучок направлялся на фотокатод ФЭУ-38, и сигнал с фотоприемника поступал через усилитель типа УР-4

на радиочастотный анализатор спектра типа С4-5, рабочий частотный диапазон которого 30–11 600 МГц. При этом наблюдались сигналы биений между продольными модами: $\Delta\nu = 150$ МГц; 300 МГц и 450 МГц, что в данном случае соответствует режиму генераций с четырьмя продольными модами.

Известно, что монохроматичность одной моды лазерного излучения ($\Delta\lambda_0$) чрезвычайно высока [9]. Поэтому длина когерентности Δl , определяющая допустимую разность хода ΔL_{\max} в двухлучевом интерферометре с He–Ne-лазером, работающим в непрерывном режиме, может достигать нескольких десятков километров и более.

Действительно, поскольку длина когерентности пропорциональна времени когерентности излучения Δt [6]

$$\Delta L_{\max} = \Delta l = c\Delta t \approx \frac{c}{\Delta\nu} = \frac{\lambda_0^2}{\Delta\lambda_0}, \quad (3)$$

то при $\Delta\nu \approx 10$ кГц (нестабилизованный одномодовый He–Ne-лазер, $\lambda = 632,8$ нм) $\Delta L_{\max} > 30$ км.

4. Полупроводниковый лазер

Исследование когерентных свойств полупроводникового лазера проводилось с использованием неравноплечего интерферометра Майкельсона с отражательной голограммной дифракционной решеткой [10], установленной в рабочей ветви интерферометра в режиме автоколлимации (рис. 3). В эксперименте использовались две сменные решетки с частотой 300

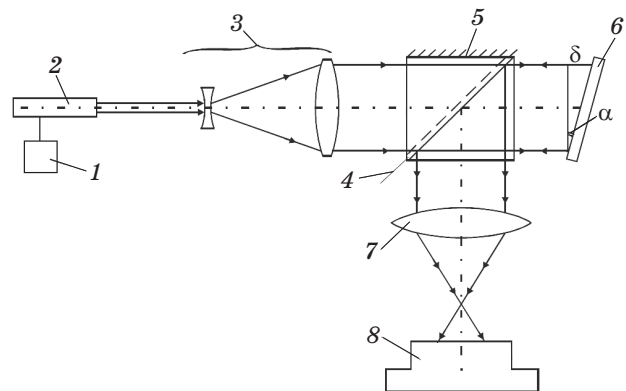


Рис. 3. Схема неравноплечего интерферометра Майкельсона. 1 – регулируемый источник тока накачки, 2 – полупроводниковый лазер, 3 – коллиматор, 4 – светоделительный кубик с зеркальной гранью, 5 – отражательная голограммная решетка, 6 – сопрягающий объектив, 7 – фотоприемное устройство, 8 – фотоприемное устройство.

и 600 мм^{-1} . В качестве объекта исследования был использован лазерный диод с $\lambda \approx 656 \text{ нм}$.

Свет от лазерного источника 2 направляется на коллиматор 3 и далее на светоделительный кубик с зеркальной гранью 5, которая формирует опорную волну. Объектная волна формируется отражательной голограммной решеткой 6, установленной под углом автоколлимации λ . При этом в меридиональной плоскости (в плоскости чертежа рис. 3) оптическая разность хода объектной волны меняется линейно вдоль светового диаметра, а в сагиттальной плоскости (перпендикулярно плоскости чертежа) она неизменна в любом сечении.

На рис. 4 представлены спектрограммы исследуемого образца, полученные на длиннофокусном спектрографе типа ДФС-453 (разработан и изготовлен в ЦКБ "Фотон") при трех различных режимах генерации, устанавливаемых путем соответствующего подбора тока накачки: преимущественно одночастотный (рис. 4а), преимущественно двухчастотный (рис. 4б) и преимущественно пятичастотный (рис. 4в). В качестве диспергирующего элемента в спектрографе используются сменные отражательные дифракционные решетки с размером заштрихованной части до $150 \times 150 \text{ мм}$ и частотой штрихов до 3600 мм^{-1} . Фокусное расстояние объектива спектрографа 3000 мм .

В данном случае расстояние между соседними модами в спектрограммах рис. 4 порядка 150 ГГц .

При этом, как было отмечено выше, в случае генерации только двух продольных мод функция $V(\Delta L)$ имеет один минимум, соответствующий оптической разности хода, равной одной длине резонатора D_R или практически любому нечетному числу его длин.

Как известно, длина резонатора у полупроводниковых лазеров весьма мала и поэтому видность полос в интерферометре Майкельсона с дифракционной решеткой при двухмодовом (двухчастотном) режиме генерации в пределах интерференционного поля успевает несколько раз принять максимальные и минимальные значения. На рис. 5 представлены интерферограммы, полученные преимущественно в одночастотном (а) и в двухчастотном (б, в, г) режимах при настройке интерферометра на полосы конечной ширины с различной ориентацией полос. При этом использована решетка с частотой штрихов 300 мм^{-1} . На рис. 6 приведены аналогичные интерферограммы, полученные с решеткой с частотой штрихов 600 мм^{-1} . Видно,

что здесь для преимущественно двухчастотного режима в интерференционном поле укладывается вдвое большее число переходов через минимумы контраста.

Важно добавить, что интерференционные картины рис. 5 и 6 получены в интерферометре при разности хода порядка 100 мм и их вид и контраст остаются практически такими же и при разности хода свыше 1500 мм .

Из интерферограмм рис. 6, с учетом формулы (1), можно определить оптическую длину

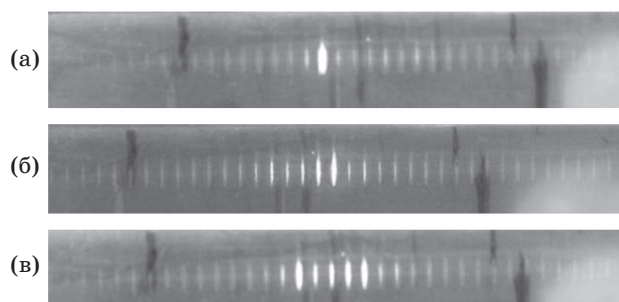


Рис. 4. Спектрограммы лазерного диода, полученные на длиннофокусном спектрографе ДФС-453 для трех различных режимов генерации: преимущественно одночастотный (а), преимущественно двухчастотный (б) и преимущественно пятичастотный (в).

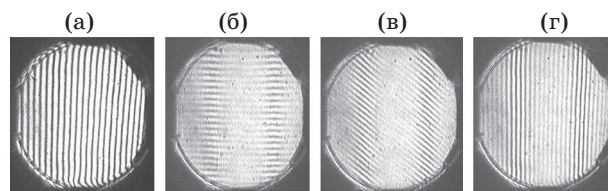


Рис. 5. Интерферограммы, полученные по схеме рис. 3 (частота решетки 300 мм^{-1}), при настройке на полосы конечной ширины преимущественно в одночастотном (а) и в двухчастотном (б, в, г) режимах.

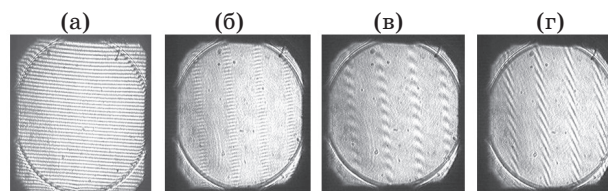


Рис. 6. Интерферограммы, аналогичные рис. 5, полученные с использованием решетки с частотой 600 мм^{-1} .

резонатора исследованного образца полупроводникового лазера. В случае двухчастотной генерации ($N = 2$) минимум контраста интерференционной картины (V) можно определить из условия

$$V = \frac{\sin\left(2\frac{\pi\Delta L}{2nD_R}\right)}{2\sin\left(\frac{\pi\Delta L}{2nD_R}\right)} = \cos\left(\frac{\pi\Delta L}{2nD_R}\right) = 0. \quad (4)$$

Первый минимум контраста наблюдается при $nD_R = \Delta L$. При 4-х периодах изменения видности в интерферограмме оптическая разность хода $2\Delta L = \delta/4$, где δ – разность хода между противоположными краями светового поля решетки (40 мм) можно найти из соотношения $\delta = d \operatorname{tg} \alpha$, где α – угол наклона решетки (угол автоколлимации), d – диаметр светового поля. Из условия автоколлимации (см. рис. 3) имеем $\alpha = \arcsin(\lambda\nu/2)$. Для лазерной длины волны $\lambda = 656$ нм и отражательной решетки с частотой 600 мм^{-1} угол дифракции $\alpha \approx 11,4^\circ$, откуда $nD_R = \Delta L = \delta/8 \approx 1$ мм.

Зная показатель преломления активного материала лазера на основе арсенида галлия ($n = 3,4$ [8]), находим геометрическую длину резонатора $D_R = \Delta L/n = 0,295 \text{ мм} \approx 300 \text{ мкм}$.

Подставив удвоенную оптическую длину резонатора в формулу (2), получим $\Delta\nu = c/(2nD_R) = 1,495 \times 10^{11} \text{ Гц} \approx 150 \text{ ГГц}$.

Отметим, что при использовании интерферометра Тваймана–Грина [11] и отражательной осевой синтезированной голограммы вместо плоской решетки рис. 3 [12], в отличие от рис. 5 и 6, интерферограммы будут иметь вид чередующих светлых и темных кольцевых структур с переменным шагом. При этом синтезированная голограмма должна иметь достаточно большое количество колец (зон Френеля). В данном случае их должно быть не менее 3500, чтобы оптическая разность хода превысила оптическую длину лазерного резонатора.

Вид интерферограмм на рис. 5 и 6 наводит на мысль о возможности использовать это свойство лазерных источников в метрологических

целях. Для этого целесообразно иметь стабилизированные лазеры, генерирующие преимущественно две продольные моды. Для повышения чувствительности такого контроля лазер должен иметь минимально достижимую оптическую длину резонатора.

Очевидно, что при голографировании объектов с глубиной сцены, существенно превышающей оптическую длину используемого полупроводникового лазерного резонатора (в нашем случае порядка 1 мм), при преимущественно двухчастотном режиме генерации должен наблюдаться эффект “зебры”. Это будут линии равной высоты. В данной задаче, по-видимому, перспективно использование голограмм сфокусированного изображения [13].

5. Заключение

Приведенные в этой статье данные позволяют утверждать, что при надлежащим выборе и стабилизации параметров накачки полупроводниковых лазеров они могут быть успешно использованы в оптической голографии и в лазерно-голографической интерферометрии. Кроме того, такие их достоинства и преимущества (по сравнению с другими типами лазеров), как компактность, высокий КПД, долговечность, устойчивость к внешним воздействиям, хорошая сочетаемость со световолоконными линиями связи, делают полупроводниковые лазеры практически незаменимыми в качестве источников монохроматического излучения в новой разрабатываемой лазерно-голографической аппаратуре для контроля юстировки многокомпонентных центрированных оптических систем в условиях космических обсерваторий.

Следует отметить, что результаты по газоразрядным лазерам были получены автором в конце 1960-х годов и приведены в его кандидатской диссертации [14], но более нигде не публиковались. Результаты по полупроводниковым лазерам были получены в 2006 году.

Полагаю, тем не менее, что представленный материал актуален и в настоящее время.

* * * * *

ЛИТЕРАТУРА

1. Афанасьева В.Л., Лукин А.В., Мустафин К.С. Определение функции распределения электронов по скоростям в разряде с полым катодом в смеси гелия и неона // ЖТФ. 1966. Т. 36. С. 526–532.
2. Штырков Е.И., Субес Э.В. О характеристиках импульсной генерации в смесях He и Ar // Опт. и спектр. 1966. Т. 21. С. 245–246.

3. *Мустафин К.С., Селезнев В.А., Штырков Е.И.* Стимулированное излучение в области отрицательного свечения тлеющего разряда // *Опт. и спектр.* 1966. Т. 21. С. 780–781.
 4. *Мустафин К.С., Селезнев В.А., Штырков Е.И.* Применение голографии для исследования распределения температурного поля пламени // *Опт. и спектр.* 1967. Т. 22. С. 319–321.
 5. *Буйнов Г.Н., Ларионов Н.П., Лукин А.В., Мустафин К.С., Рафиков Р.А.* Голографический интерференционный контроль асферических поверхностей // *ОМП.* 1971. № 4. С. 6–11.
 6. *Борн М., Вольф Э.* Основы оптики // М.: Наука, 1970. С. 346–352.
 7. *Сотский Б.А., Гончаренко А.М.* О связи когерентности излучения с числом мод квантового генератора // *Опт. и спектр.* 1965. Т. 19. № 5. С. 788–791.
 8. *Звелто О.* Физика лазеров // М.: Мир, 1979. С. 151. С. 256–264.
 9. *Бирнбаум Дж.* Оптические квантовые генераторы // М.: Сов. радио. 1967. С. 210–229.
 10. *Васильев Л.А., Еришов И.В.* Интерферометр с дифракционной решеткой // М.: Машиностроение, 1976. С. 22–24.
 11. *Коломийцов Ю.В.* Интерферометры // Л.: Машиностроение, 1976. С. 245–247.
 12. *Лукин А.В.* Голограммные оптические элементы // *Оптический журнал.* 2007. № 1. С. 80–87.
 13. ГОСТ 24865.1-81. Голография и голографические методы контроля качества. М.: Издательство стандартов. 1982. С. 14.
 14. *Лукин А.В.* Исследование свойств голограмм как оптических элементов и возможностей их применения для контроля качества поверхностей сложной формы // Автореф. канд. дис. Л.: ГОИ, 1974. 30 с.
-