

ПРЕЦИЗИОННЫЕ ДАЛЬНОМЕРЫ НА ОСНОВЕ ДВУХВОЛНОВОГО ИНЖЕКЦИОННОГО ЛАЗЕРА

© 2008 г. В. Л. Козлов, канд. техн. наук

Белорусский государственный университет, Минск, Белоруссия

E-mail: KozlovVL@bsu.by

Для прецизионных лазерных дальномерных систем предлагаются рециркуляционный и импульсно-фазовый методы измерения дальности на основе двухволнового инжекционного лазера. В качестве излучателя дальномера используется лазерный диод с асимметричной квантоворазмерной гетероструктурой, обеспечивающий генерацию зондирующего излучения на двух различных длинах волн в зависимости от тока накачки. Система позволяет получить информацию о скорости распространения излучения в среде вдоль линии наблюдения и учесть ее значение при расчете дальности по величине оптической задержки, что повышает точность измерения расстояний.

Коды OCIS: 150.5670, 280.3400.

Поступила в редакцию 22.10.2007.

Относительная погрешность измерения расстояний одноволновыми лазерными дальномерами по величине оптической задержки сигнала на дистанции ограничена значениями порядка 10^{-6} из-за отсутствия информации о скорости распространения излучения вдоль линии наблюдения в конкретных метеоусловиях. Так, например, для излучения на длине волны 0,8 мкм при изменении температуры на один градус коэффициент преломления воздуха изменяется на $0,9 \times 10^{-6}$. Для прецизионных лазерных дальномерных систем среднеквадратичная погрешность измерений, обусловленная дисперсионными свойствами атмосферы, может быть снижена до единиц сантиметров путем расчета группового показателя преломления, если известны давление, температура и влажность. Однако эта операция достаточно трудоемка и требует привлечения дополнительных метеорологических средств и вычислительной техники.

Для учета состояний среды при распространении зондирующего излучения вдоль линии наблюдения предлагаются рециркуляционный метод измерения дальности [1], основанный на оптоэлектронной рециркуляции одновременно на двух длинах волн, и импульсно-фазовый метод [2], реализующий режим автоматической подстройки частоты зондирующих импульсов, при которой на дистанции будет укладываться целое число периодов на одной из оптических длин волн. Системы позволяют получить информацию о скорости распространения излучения на трассе и учесть ее значение при вычислении дальности.

Двухволновой рециркуляционный дальномер

Функциональная схема двухволнового рециркуляционного лазерного дальномера показана на рис. 1. В качестве излучателя дальномера предлагается использовать лазерный диод на основе асимметричной квантоворазмерной гетероструктуры. Структура таких инжекционных лазеров описана в [3]. Активная область лазерного диода содержит две квантовые ямы разной ширины. Одна квантовая яма шириной 8 нм изготовлена на GaAs, а другая квантовая яма шириной 6 нм – на $Al_{0,12}Ga_{0,88}As$. Квантовые ямы, барьерный и обкладочные слои лазера образуют единый оптический волновод для генерируемого излучения на двух различных длинах волн. При увеличении тока инжекции генерация начинается на большей длине волны λ_1 . В режиме генерации концентрация неравновесных носителей тока в более широкой квантовой яме практически не изменяется, так как в ней усиливается длинноволновое излучение. Дальнейшее увеличение тока приводит к возникновению генерации на более короткой длине волны λ_2 , которая усиливается в обеих квантовых ямах. Возрастание интенсивности когерентного излучения на этой длине волны сопровождается падением интенсивности длинноволнового излучения. Переключение длины волны генерации от $\lambda_1 = 837$ нм на $\lambda_2 = 787$ нм происходит при изменении тока инжекции от 34 до 36 мА. Длительность электрических импульсов и, соответственно, импульсов излучаемого света на разных длинах волн

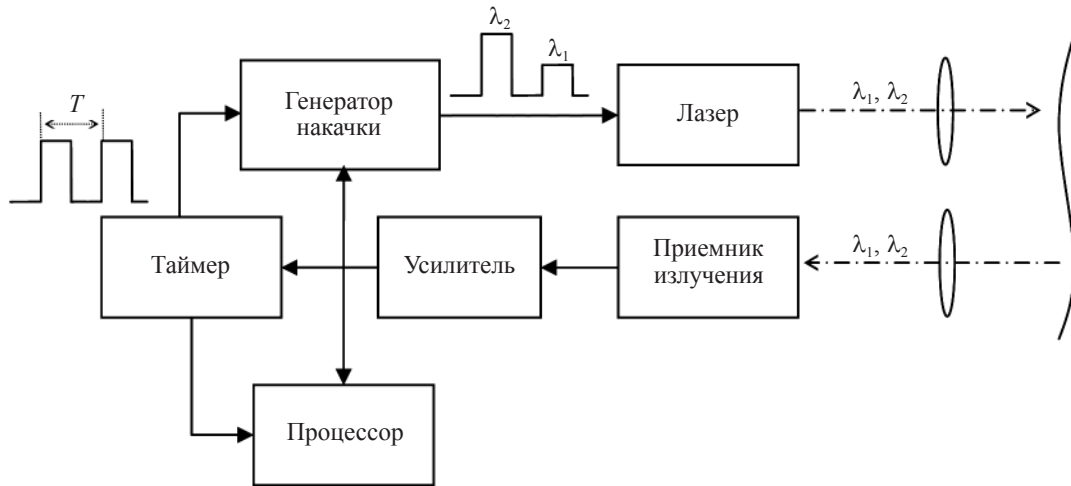


Рис. 1. Функциональная схема двухволнового рециркуляционного лазерного дальномера.

может быть достаточно малой, вплоть до 2 нс. Разность длин волн генерации $\Delta\lambda = \lambda_1 - \lambda_2$ для асимметричных квантоворазмерных лазерных диодов достигает значений 20–70 нм. Если использовать терморегулятор на эффекте Пельтье и стабилизировать импульсы тока инжекции, то относительная нестабильность разности длин волн генерации может быть меньше 10^{-3} .

Дальномер работает следующим образом. В начальный момент времени блок “Таймер” формирует два импульса, разнесенные во времени на интервал T . Блок “Генератор накачки” формирует соответствующие амплитуды импульсов тока для запуска лазера на длинах волн λ_1 и λ_2 . Для рециркуляционных датчиков дальности измеряемое расстояние играет роль оптической линии задержки в петле обратной связи. При замыкании оптической обратной связи в системе устанавливается процесс рециркуляции с частотой, которая определяется задержкой излучения на дистанции и постоянной электрической задержки в функциональных блоках системы. Таким образом, измеряя частоту рециркуляции, можно определить расстояние до объекта.

Используя описанный выше режим работы полупроводникового лазера, на дистанцию поочередно посылаются оптические импульсы на длинах волн λ_1 и λ_2 . Так как скорость распространения излучения в воздухе зависит от длины волны, причем $\lambda_2 < \lambda_1$, то задержка на дистанции излучения при λ_2 будет больше, чем при λ_1 . Разность оптических задержек за один период рециркуляции составляет

$$\Delta t = (2L/c)(n_2 - n_1), \quad (1)$$

где L – измеряемое расстояние, n_1 и n_2 – показатели преломления воздуха при λ_1 и λ_2 соответственно.

При разности длин волн, равной 20 нм, значение Δt на расстоянии $L = 1$ км составляет порядка 1 пс. Очевидно, что измерение таких коротких временных интервалов вызывает большие сложности. Однако в режиме рециркуляции происходит накопление разности временных задержек, и за число периодов рециркуляции $N = 10^4 - 10^5$ разность задержек становится равной $T = N\Delta t$ и достигает десятков или сотен наносекунд. В разработанной системе для измерения Δt определяется число периодов рециркуляции N , за которое разность задержек станет равной 100 нс. В этом случае дальность вычисляется по формуле

$$L = (c/2n_1)t_{\text{opt}} = (c/2)[t_{\text{opt}} - (n_1 - 1/\Delta n_1)(T/N)], \quad (2)$$

где t_{opt} – время задержки излучения на дистанции при λ_1 , n_1 – показатель преломления воздуха при λ_1 , $\Delta n_1 = n_2 - n_1$ – разность показателей преломления при λ_2 и λ_1 в условиях измерений.

Значения n_1 и Δn_1 можно рассчитать на основании справочных данных [4]. В частности, как международный стандарт утверждена следующая формула для дисперсии воздуха:

$$n = 1 + \frac{n_c - 1}{1 + \frac{\alpha}{1 + 15\alpha}} \frac{p}{760} - \frac{55 \times 10^{-9} e}{1 + \alpha t}. \quad (3)$$

Здесь $\alpha = 0,00367$ – коэффициент объемного расширения воздуха, t – температура ($^{\circ}\text{C}$), p – барометрическое давление (мм рт. ст.), e – параметр, учитывающий влажность воздуха, n_c – дисперсия сухого воздуха ($e = 0$) при условиях $t = 15$ $^{\circ}\text{C}$ и $p = 760$ мм рт. ст. Очевидно, при наличии флуктуаций температуры и давления на трассе берутся средние значения t и p .

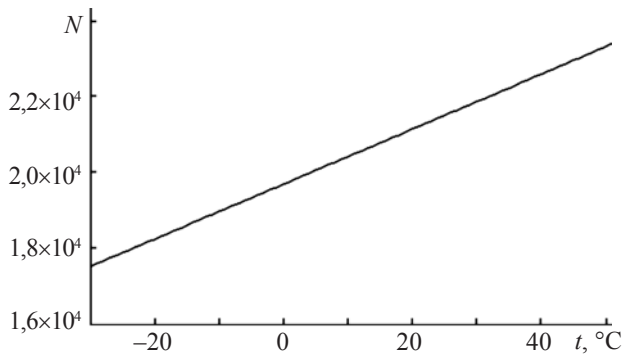


Рис. 2. Число периодов рециркуляции в зависимости от температуры окружающей среды для $\Delta\lambda = 50$ нм, $L = 3$ км.

Из выражения (3) можно увидеть, что если заданы λ_1 и λ_2 , то обратная относительная дисперсия воздуха, равная отношению $(n_1 - 1)/(n_2 - n_1)$, оказывается практически постоянной независимо от условий окружающей среды. Далее для удобства используем значения n_0 и Δn_0 при определенных условиях окружающей среды, например, $t = 0$ °C и $p = 760$ мм рт. ст. Эти значения можно рассчитать или найти из справочных данных. Тогда на основании соотношения

$$(n_1 - 1)/\Delta n_1 = (n_0 - 1)/\Delta n_0 \quad (4)$$

получаем окончательную формулу для расчета длины трассы

$$L = (c/2) \{t_{\text{opt}} - [(n_0 - 1)/\Delta n_0](T/N)\}. \quad (5)$$

На рис. 2 приведены значения числа периодов рециркуляции N , необходимого для измерения дальности с учетом дисперсии на трассе, для дистанции

$L \approx 3$ км в зависимости от температуры окружающей среды при $\Delta\lambda = 50$ нм. N показывает число периодов рециркуляции, за которые разность оптических задержек на дистанции Δt при $\lambda_1 = 837$ нм и $\lambda_2 = 787$ нм достигнет $T = 100$ нс. Для расстояний $L \approx 0,5-5$ км и $\Delta\lambda = 20-70$ нм разность оптических задержек излучения на дистанции Δt в зависимости от температуры окружающей среды изменяется в пределах 1–15 пс. Для частот рециркуляции порядка сотен килогерц время определения дальности с учетом дисперсии на трассе составит менее 1 с.

Двухволновой импульсно-фазовый дальномер

Функциональная схема двухволнового импульсно-фазового лазерного дальномера показана на рис. 3. В качестве излучателя дальномера предлагается использовать лазерный диод с асимметричной квантоворазмерной гетероструктурой [5]. Активная область лазера состоит из двух или трех квантоворазмерных слоев, излучающих одновременно на двух разных длинах волн. Благодаря подбору параметров квантоворазмерных слоев и легированию барьерных слоев между ними осуществляется неоднородное возбуждение активной области, и лазер излучает регулярные импульсы излучения на двух длинах волн с частотой повторения сотни МГц и длительностью импульса меньше 1 нс. При этом разность длин волн генерации достигает $\Delta\lambda = 20-70$ нм в зависимости от материала гетероструктуры, а стабильность разностной длины волны обеспечивается синхронизацией электронно-оптических процессов в активной области лазера.

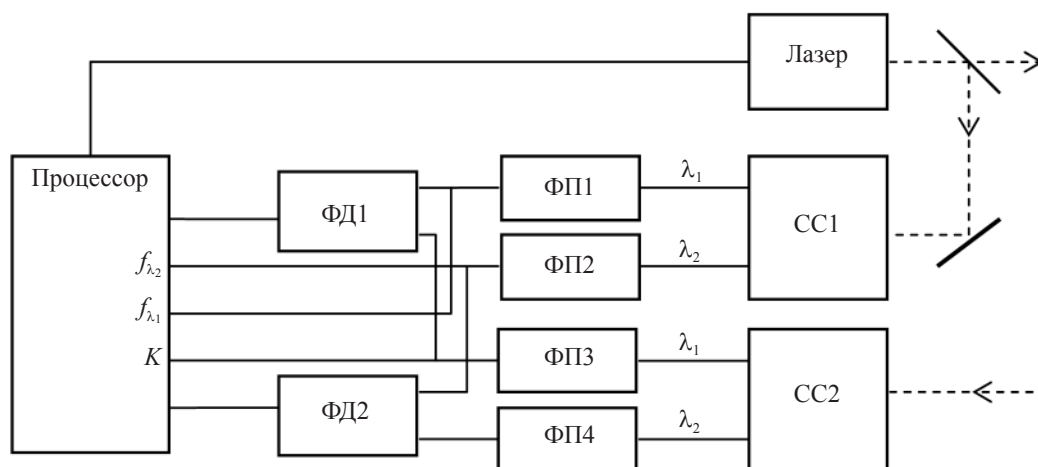


Рис. 3. Функциональная схема двухволнового импульсно-фазового лазерного дальномера.

Принцип измерения дальномера заключается в установлении такой частоты следования зондирующих импульсов, при которой на дистанции будет укладываться ее целое число периодов, т. е. фаза оптического импульса, прошедшего измеряемое расстояние, будет равна фазе опорного импульса, прошедшего контрольную линию задержки, используемую в качестве нулевого отсчета. Лазер излучает на дистанцию оптические импульсы с частотой f на длинах волн λ_1, λ_2 . Согласно [5] частота следования лазерных импульсов следующим образом зависит от тока накачки:

$$f = (1/2\pi)\sqrt{(vk_l/\tau)[(j/j_{th}) - 1]}, \quad (6)$$

где v – скорость света, k_l – коэффициент потерь в резонаторе, τ – время жизни носителей тока, j – плотность тока накачки, j_{th} – плотность порогового тока. Значение частоты f находится в пределах сотни МГц – 1 ГГц, и с помощью тока легко обеспечивается перестройка частоты на 10–20%. При этом благодаря подбору параметров квантоворазмерных слоев и легированию барьерных слоев между ними [5] значения λ_1, λ_2 генерации и разностной длины волны $\Delta\lambda$ практически не изменяются.

Полупрозрачное зеркало направляет часть излучения лазера для использования в качестве опорного сигнала. Оптическое излучение лазера, прошедшее опорную линию задержки, и излучение, пришедшее с дистанции, попадают, соответственно, на первый и второй спектральные селекторы СС1, СС2, где происходит пространственное разделение излучения на два пучка, в одном из которых концентрируется излучение на λ_1 , в другом – λ_2 . Затем излучение регистрируется фотоприемниками ФП1–ФП4.

В дальномере реализуется режим автоматической подстройки частоты зондирующих импульсов таким образом, что при частоте следования импульсов f_{λ_1} на дистанции будет укладываться целое число периодов на длине волны λ_1 , а при частоте f_{λ_2} – целое число периодов на длине волны λ_2 . Управляющие сигналы для автоподстройки берутся с выходов фазовых детекторов ФД1 и ФД2. Целое число периодов зондирующих импульсов K , укладываемых за время распространения излучения на дистанции, определяется в блоке “Процессор” путем измерения разности числа импульсов по входу K и счетному входу f_{λ_1} .

Используя выражение (5), формула для расчета дальности будет иметь вид

$$L = (c/2)[t_{opt} - (\Delta t/\Delta n_0)(n_0 - 1)], \quad (7)$$

где Δt – разность оптических задержек излучения при λ_1 и λ_2 на измеряемой дистанции.

Время задержки излучения определяется по значениям частоты f_{λ_1} и числа периодов зондирующих импульсов K , укладываемых за время распространения излучения на дистанции, а разность оптических задержек определяется по разности периодов следования импульсов с частотами f_{λ_1} и f_{λ_2}

$$t_{opt} = K/f_{\lambda_1}, \quad \Delta t = (K/f_{\lambda_2}) - K/f_{\lambda_1}. \quad (8)$$

Из выражений (7) и (8) получаем окончательную формулу для расчета дальности

$$L = (cK/2)\{(1/f_{\lambda_1}) - [(n_0 - 1)/\Delta n_0](1/f_{\lambda_1}) - 1/f_{\lambda_2}\}. \quad (9)$$

На рис. 4 приведены значения $\Delta f = f_{\lambda_1} - f_{\lambda_2}$ для дистанции $L \approx 3$ км в зависимости от температуры окружающей среды при $\Delta\lambda = 50$ нм для частоты импульсов порядка сотни мегагерц. При этом разность оптических задержек Δt на дистанции на $\lambda_1 = 837$ нм и $\lambda_2 = 787$ нм находится в пределах 5–6 пс. Очевидно, что прямое измерение таких коротких временных интервалов вызывает большие сложности, поэтому в разработанном дальномере измеряются не временные интервалы, а частоты f_{λ_1} и f_{λ_2} , при этом измерение частоты практически проще и возможно с высокой степенью точности. Время измерения дальности с учетом дисперсии на дистанции составляет 2–3 с.

Сравнение результатов измерения дальности одноволновым дальномером ($\lambda = 837$ нм) и разработанными двухволновыми импульсно-фазовым и рециркуляционным дальномерами ($\lambda_1 = 837$ нм, $\lambda_2 = 787$ нм) представлено на рис. 5, где показана зависимость разности показаний дальномеров $\Delta L = L_1 - L_2$ от измеряемого расстояния L при различных температурах окружающей среды и давлении 760 мм рт. ст. Очевидно, показания дальномеров будут совпадать лишь при 0 °С. При других температурах одноволновый дальномер дает погрешность до 10 см, что связано с отсутствием информации о

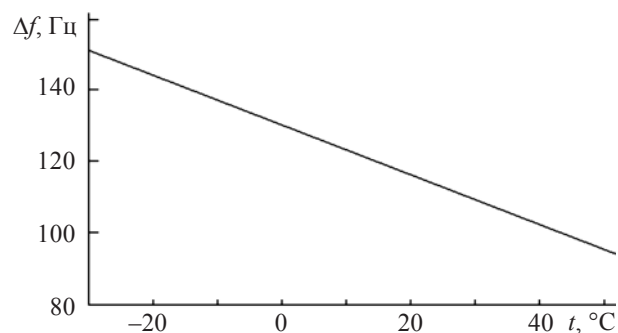


Рис. 4. Зависимость разности частот от температуры окружающей среды для $\Delta\lambda = 50$ нм, $L \approx 3$ км.

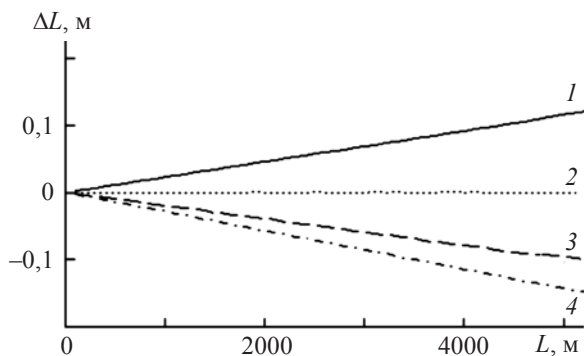


Рис. 5. Зависимости разности показаний одно- и двухволнового дальномеров ΔL от измеряемого расстояния L при различных температурах окружающей среды: 1 – $-20\text{ }^{\circ}\text{C}$, 2 – $0\text{ }^{\circ}\text{C}$, 3 – $+20\text{ }^{\circ}\text{C}$, 4 – $+30\text{ }^{\circ}\text{C}$.

скорости распространения излучения на трассе. Значения дистанции при одноволновых измерениях будут завышены при минусовых температурах по шкале Цельсия и занижены при плюсовых температурах по Цельсию по сравнению с показаниями двухволнового дальномера.

Погрешность измерений одноволновым дальномером по сравнению с двухволновыми измерениями можно оценить по формуле

$$\Delta L = -L(n_c - 1) \left(1 + 15\alpha\right) \frac{P}{760} \alpha t. \quad (10)$$

Как видно, ошибка ΔL растет линейно с длиной измеряемой трассы L , слабо изменяется с атмосферным давлением и практически не зависит от длины волны лазерного излучения. При 760 мм рт. ст. на длинах волн вблизи 1 мкм приближенно находим

$$\Delta L = -L\delta t, \quad (11)$$

где $\delta = 1,06 \times 10^{-6}$.

Таким образом, благодаря использованию в качестве источника излучения полупроводникового лазера с асимметричной квантоворазмерной гетеро-

структурой удается сформировать в дальномере зондирующий сигнал на двух различных длинах волн оптического диапазона. Это позволяет получить информацию о скорости распространения излучения вдоль линии наблюдения и учесть ее значение при расчете дальности по величине оптической задержки, что повышает точность измерения расстояний. По сравнению с другими известными двухволновыми дальномерами разработанная система имеет преимущества в том, что оба зондирующих сигнала на разных длинах волн генерируются в одном оптическом резонаторе, что обеспечивает стабильность разностной длины волны в результате синхронизации электронно-оптических процессов в активной области лазера, а информационные импульсы проходят через одну и ту же систему оптико-электронной обработки. Лазеры на асимметричных квантоворазмерных гетероструктурах [5] также способны излучать пробные оптические сигналы со стабильной амплитудой и частотой повторения в гигагерцовом диапазоне. Это обеспечивает дополнительные возможности для создания новых высокоэффективных импульсных систем лазерной дальнометрии.

ЛИТЕРАТУРА

1. Козлов В.Л. Прецизионный рециркуляционный дальномер // Патент Республики Беларусь № 8172. 2006.
2. Козлов В.Л., Кононенко В.К., Манах И.С. Прецизионный лазерный дальномер // Патент Республики Беларусь № 6263. 2004.
3. Ikeda S., Shimizu A. Evidence of the wavelength switching caused by a blocked carrier transport in an asymmetric dual quantum well laser // Appl. Phys. Lett. 1991. V. 59. № 5. P. 504–506.
4. Эберт Г. Краткий справочник по физике. М.: ГИФМЛ, 1963. С. 240–241.
5. Афоненко А.А., Кононенко В.К., Манах И.С. Полупроводниковый лазер // Патент Республики Беларусь № 1385. 1996.