

## ОПТИКО-ФИЗИЧЕСКИЕ МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЙ И ИЗМЕРЕНИЙ

УДК 520.2.064.4, 621.373.826, 681.785.556

### ИССЛЕДОВАНИЕ ТЕМПЕРАТУРНОГО СМЕЩЕНИЯ ДЛИНЫ ВОЛНЫ ПОЛУПРОВОДНИКОВОГО ЛАЗЕРНОГО ДИОДА В ДОПЛЕРОВСКОМ АНЕМОМЕТРЕ

© В. А. Павлов, Г. В. Бакакин, В. В. Рахманов, С. В. Двойнишников

*Институт теплофизики им. С. С. Кутателадзе СО РАН,  
630090, г. Новосибирск, просп. Академика Лаврентьева, 1  
E-mail: pavlov@itp.nsc.ru*

Стабильность длины волны лазерного излучения в зависимости от температуры является важной характеристикой лазерного доплеровского анемометра с хроматическим разделением каналов. Выполнены экспериментальные исследования смещения длины волны полупроводникового лазерного диода на 660 нм в зависимости от температуры и мощности лазерного излучения. Установлено, что температурный дрейф длины волны лежит в пределах 0,2 нм/°С. Показано, что применение полупроводниковых диодов данного типа в лазерных доплеровских анемометрах с хроматическим разделением каналов возможно, но требует тщательного подбора оптических фильтров.

*Ключевые слова:* смещение длины волны, полупроводниковый лазерный диод, лазерный доплеровский анемометр.

DOI: 10.15372/AUT20220301

**Введение.** В гидродинамических экспериментах часто необходимо обеспечить измерение всех трёх компонент вектора скорости измеряемого потока [1]. Один из методов, позволяющих достичь поставленной задачи, разработан на основе лазерного доплеровского анемометра (ЛДА) [2].

Наиболее распространённый тип ЛДА — это однокомпонентный прибор, измеряющий одну компоненту вектора скорости. На его основе возможно измерение всех трёх компонент вектора скорости с применением метода фазового осреднения с синхронизацией по процессу или осреднением по времени [3, 4]. Метод характеризуется получением трёхмерного вектора скорости путём последовательного измерения каждой из компонент скорости в одной и той же точке измерительного объёма с привязкой к фазе протекающего процесса. Это возможно, если течение циклично или если от эксперимента к эксперименту течение не меняется. Применение синхронизации измерений с гидродинамическим процессом позволяет по реперным меткам в развёртке пульсаций давления на стенке восстановить трёхмерные векторы скорости в зависимости от периода повторяющегося процесса. Данный метод даёт возможность получить усреднённые по фазе процесса все три компоненты вектора скорости.

Недостатком такого метода является длительное время сбора информации и высокие требования к точности позиционирования точки измерения в потоке под разными углами.

Также широко применяется метод получения трёх компонент скорости гидродинамического потока с хроматическим разделением оптических каналов [5–7]. Для построения трёх компонент вектора скорости используются три источника лазерного излучения с разными длинами волн и независимые фотоприёмники с фильтрацией сигналов только необходимой длины волны для получения трёх компонент вектора скорости.

К существенному недостатку этого метода можно отнести сложность измерения полного вектора скорости в средах с оптическим показателем преломления, отличным от единицы [8]. В результате рефракции измерительные зоны разных лучей расходятся в воде вдоль оптической оси прибора в зависимости от заглубления в измерительный объём [9]. Так, в ЛДА компании Dantec (Нидерланды) традиционно используются лазеры с длинами волн 417, 488 и 514 нм. Коэффициент преломления воды при нормальных условиях для этих длин волн равен 1,343, 1,337, 1,335 соответственно. И при измерении в воде (без учёта влияния иллюминатора и угла вхождения лучей) уже при заглублении на 100 мм измерения будут происходить в точках, удалённых друг от друга на расстоянии 0,8 мм для длин волн 417 и 514 нм. Это может вносить существенную погрешность в измерение трёхмерного вектора скорости (в зависимости от течения).

Для уменьшения влияния рефракции в среде на погрешность измерений возможно использовать лазерное излучение с близкими длинами волн. Однако такой подход требует использования приёмных полосовых оптических фильтров для разделения каналов с узкой полосой пропускания света, высоким коэффициентом пропускания (90–99 %) и хорошим подавлением пропускания вне полосы (более 99,5 %). В последнее время такие фильтры стали доступны для массового коммерческого использования [10].

Известны трёхкомпонентные ЛДА на основе двух коммутационных полупроводниковых  $2D$  ЛДА с адаптивным временным разделением сигналов в оптических каналах [11]. Каждый прибор обеспечивает измерение двух компонент вектора скорости за счёт переключения оптических каналов во времени. При этом приборы одновременно принимают рассеянный свет только от своего источника излучения за счёт поляризационных фильтров. Это необходимо для независимых измерений скорости двумя приборами. Восстановление полного вектора скорости обеспечивается сведением в одну точку измерительных зон приборов, размещённых под углом друг к другу.

Такой метод построения трёхкомпонентного ЛДА хорошо зарекомендовал себя, однако и у него есть недостатки. В случае низкого соотношения сигнал/шум поляризационный фильтр не полностью подавляет паразитное оптическое излучение от «чужого» прибора.

Для решения этой проблемы были дополнительно разнесены длины волн двух двухкомпонентных ЛДА. Это позволило улучшить оптическую развязку двух приборов за счёт полосовых оптических фильтров в дополнение к поляризационным. Были выбраны лазерные диоды с длинами волн 638 и 660 нм. Это даёт возможность проводить измерения в средах с показателем преломления, отличным от единицы. Так, для воды на этих длинах волн показатели преломления равны 1,332 и 1,331 соответственно. При заглублении в поток на 100 мм расхождение точек измерения, вызванное разницей коэффициентов преломления, будет не более 0,1 мм.

Температурный дрейф длины волны полупроводниковых лазерных диодов имеет разброс от образца к образцу и находится на уровне 0,3 нм/градус в диапазоне температур от 20 до 60 °С [12]. Для таких величин температурного дрейфа длин волн целесообразно применение узкополосных оптических фильтров с полосой пропускания 10–20 нм. Однако для точного подбора центральной частоты фильтра необходимо знать температурную зависимость для конкретного образца лазерного диода.

Характеристика пропускания стандартного оптического фильтра имеет гауссоподобное распределение. Модельный ряд данных фильтров имеет основной шаг 10 нм между центральными частотами в диапазоне 600–700 нм за исключением выделенных длин волн под газовые лазеры. Если разница частот лазерного излучения и центральной частоты фильтра более 3 нм, то для фильтра с полосой пропускания 10 нм это приведёт к потере до 15–20 % интенсивности приёмного сигнала от максимума для данного фильтра. При рассогласовании в 5 нм ослабление сигнала может достигать величины 90 %, что существенно ухудшит соотношение сигнал/шум в приёмном тракте.

Таким образом, для достижения целевого ослабления сигнала не более 10 % необходимо, чтобы смещение длины волны лазерного диода в результате температуры не превышало  $\pm 2$  нм относительно центральной частоты пропускания оптического фильтра. Применение же фильтров с полосой пропускания более 20 нм не позволит эффективно (более чем на два порядка) ослабить интенсивность излучения «чужого» лазера.

Цель работы — исследование температурного смещения длины волны полупроводникового лазерного диода с номинальной длиной волны 660 нм для использования в качестве излучателя лазерного доплеровского анемометра.

**Теоретический анализ.** При построении лазерных доплеровских анемометров для измерения трёх компонент вектора скорости необходимо, с одной стороны, использовать лазерные источники излучения с близкими длинами волн для снижения влияния рефракции в среде распространения лазерных пучков, а с другой стороны, обеспечить «невидимость» оптического излучения одной компоненты оптико-электронного модуля от других компонент.

Рассмотрим ситуацию с двухкомпонентными ЛДА. Пусть интенсивность лазерного излучения в плоскости фотоприёмника имеет зависимость от длины волны и температуры  $u(\lambda, t, x, y)$ . Тогда регистрируемая фотоприёмником интенсивность излучения описывается выражением

$$I(t) = \iiint u(\lambda, t, x, y)g(\lambda) dx dy d\lambda,$$

где  $g(\lambda)$  — функция чувствительности фотоприёмника в зависимости от длины волны излучения. Пусть фотоприёмники обеих компонент вектора скорости имеют одинаковые функции  $g(\lambda)$  и различные зависимости интенсивности лазерного излучения от длины волны  $u_1(\lambda, t, x, y)$  и  $u_2(\lambda, t, x, y)$ . При использовании узкополосных оптических фильтров с характеристиками  $h_1(\lambda)$  и  $h_2(\lambda)$  на фотоприёмниках, пропускающих лазерное излучение от «своего» излучателя и подавляющих излучение «чужого», получим следующие условия для измерения двух компонент вектора скорости:

$$I_1(t) = \iiint u_1(\lambda, t, x, y)h_1(\lambda)g(\lambda) dx dy d\lambda + \iiint u_2(\lambda, t, x, y)h_1(\lambda)g(\lambda) dx dy d\lambda,$$

$$I_2(t) = \iiint u_2(\lambda, t, x, y)h_2(\lambda)g(\lambda) dx dy d\lambda + \iiint u_1(\lambda, t, x, y)h_2(\lambda)g(\lambda) dx dy d\lambda,$$

$$\iiint u_1(\lambda, t, x, y)h_1(\lambda)g(\lambda) dx dy d\lambda \gg \iiint u_2(\lambda, t, x, y)h_1(\lambda)g(\lambda) dx dy d\lambda, \quad (1)$$

$$\iiint u_2(\lambda, t, x, y)h_2(\lambda)g(\lambda) dx dy d\lambda \gg \iiint u_1(\lambda, t, x, y)h_2(\lambda)g(\lambda) dx dy d\lambda. \quad (2)$$

Выражения (1) и (2) показывают, что фотоприёмники от соответствующих модулей должны видеть рассеянное измеряемым объектом излучение только от «своего» лазерного источника. Для достижения этого результата необходима стабильность длины волны лазерного излучателя.

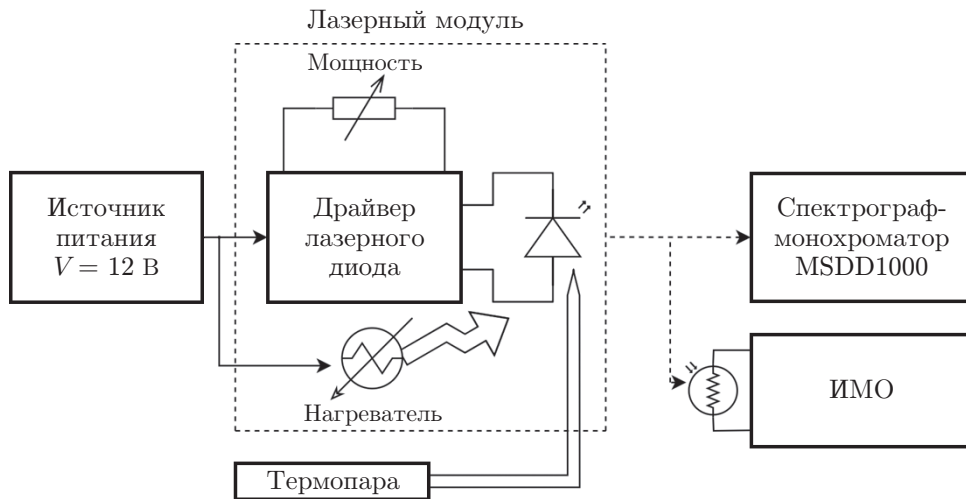


Рис. 1. Структурная схема экспериментального стенда

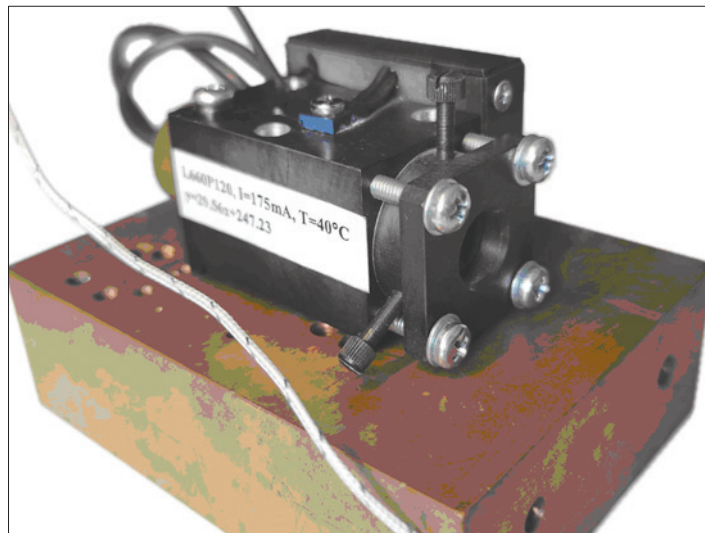


Рис. 2. Внешний вид лазерного излучателя на медной подставке

**Экспериментальный стенд.** Для измерения смещения длины волны полупроводникового лазерного диода был собран экспериментальный стенд (рис. 1), который состоит из лазерного модуля со стабилизацией по мощности излучения лазерного диода L660P120, датчика температуры на основе термопары хромель — алюмель, измерителя оптической мощности ИМО-2Н и спектрографа-монохроматора MSDD1000. Стабилизация по мощности излучения лазерного диода происходит за счёт обратной связи по току встроенного в лазерный диод фотодиода контроля и не требует внешнего фотоприёмника. Время сканирования одного оптического спектра с помощью спектрографа-монохроматора MSDD1000 в экспериментах было порядка 10 мс.

Для измерения характеристик лазерного диода при температурах ниже комнатной, лазерный модуль устанавливался на охлаждённом до  $+5\text{ }^{\circ}\text{C}$  медном бруске (рис. 2).

После установки модуля лазерного излучения в выключенном состоянии на медную подставку температура модуля в течении 10 мин понижалась от комнатной до значений  $+18 - 19\text{ }^{\circ}\text{C}$ . Затем на лазерный модуль подавалось питание от источника постоянного напряжения 12 В. Нагрев лазерного модуля происходил за счёт встроенного термоста-

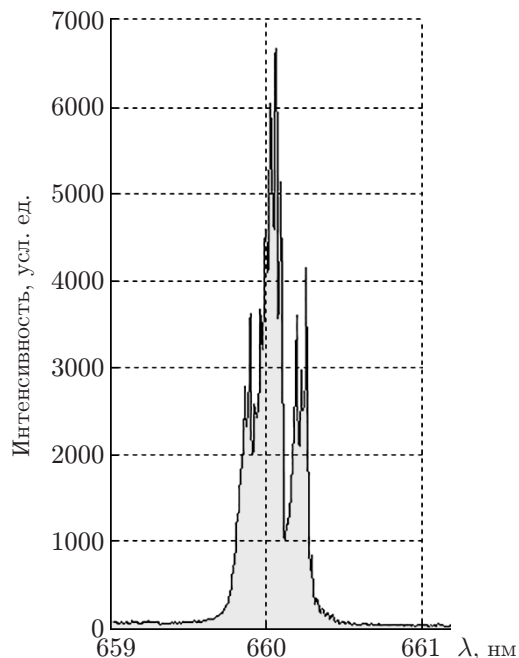


Рис. 3. Характерный спектр оптического излучения лазерного диода

биллизатора до температуры  $+45\text{ }^{\circ}\text{C}$ . Время проведения одного эксперимента составляло порядка 60 мин.

Так как время измерения одного спектра составляет порядка 10 мс, а время изменения температуры лазера на  $1^{\circ}$  в начале кривой нагрева — около 3 с, то для уменьшения времени проведения эксперимента температура лазера не стабилизировалась до промежуточных значений. И оптические спектры измерялись в динамике.

Минимальная температура, при которой регистрировалась длина волны лазера, составляла  $+20\text{ }^{\circ}\text{C}$ .

Измерение температуры с помощью термопары хромель — алюмель проводилось максимально близко к лазерному диоду через отверстие в корпусе лазерного модуля. В качестве преобразователя термоЭДС использовался нормирующий преобразователь с погрешностью измерения температуры не более  $\pm 0,5\%$ .

Поскольку лазерный модуль имел встроенную стабилизацию мощности излучения, то установить постоянный ток лазерного диода напрямую не получалось. Поэтому измерения смещения длины волны лазерного излучения проводились при четырёх значениях мощности излучения: 30, 60, 90 и 120 мВт. Мощность контролировалась независимо с помощью измерителя средней мощности и энергии лазерного излучения ИМО-2Н.

В процессе нагрева лазерного диода измерялся спектр излучения посредством спектрографа-монокроматора MSDD1000 со спектральным разрешением по длине волны 0,012 нм. По полученным данным определялся центральный пик, имеющий наибольшую интенсивность. Положение пика спектра по длине измерялось в идущем в комплекте со спектрографом-монокроматором программном обеспечении автоматически. В случае наличия двух и более пиков в спектрограмме положение пика определялось по пику с максимальной интенсивностью. Спектр излучения лазерного диода состоит из нескольких близких спектральных пиков мощности, и в процессе нагрева модовый состав может меняться. Характерный вид спектра лазерного излучения для данного диода при мощности излучения 120 мВт и температуре  $20\text{ }^{\circ}\text{C}$  показан на рис. 3. Полная ширина на полувысоте такого спектра составляет около 0,3 нм.

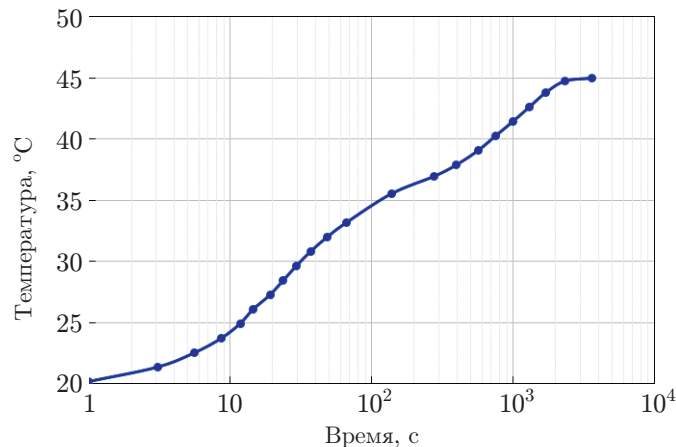


Рис. 4. Нагрев лазерного модуля от времени в логарифмическом масштабе

**Экспериментальные данные.** Сначала были проведены измерения времени прогрева лазерного диода для оценки продолжительности экспериментов. Для данного модуля со схемой термостабилизации этот график приведён на рис. 4.

Из графика зависимости температуры лазерного модуля от времени видно, что время стабилизации данного модуля при работе от 20 до 45 °C составило 60 мин. Наибольший рост температуры происходит в течении первых 30 мин. Данный график приведён для максимальной мощности излучения лазерного диода в 120 мВт. При других значениях мощности лазерного излучения кривая зависимости от времени существенно не изменялась, так как система термостабилизации лазерного модуля имеет мощность 24 Вт, что в 35 раз больше, чем максимальная электрическая мощность лазерного диода.

Одновременно с изменением температуры проводились измерения спектральных характеристик лазерного излучения с помощью спектрографа-монокроматора MSDD1000. На рис. 5 приведены значения центрального пика длины волны лазерного излучения диода L660P120 от температуры при четырёх значениях мощности оптического излучения. Каждое измерение проводилось около 60 мин.

Из приведённых графиков видно, что у данного диода длина волны лазерного излучения существенно зависит от температуры. При изменении температуры от 20 до 45 °C длина волны изменяется на величину от 4,1 до 4,8 нм. Температурный дрейф, максимальный для мощностей излучения 30 и 120 мВт, достигает 0,19 нм/°C. Для промежуточных величин мощности температурный дрейф меньше, но незначительно.

Начальная температура для каждого измерения различна и полученная длина волны отличается от измерения к измерению на 0,25 нм. Вероятно, начальное смещение длины волны связано с тем, что температура в точке измерения отличалась от температуры кристалла полупроводникового лазерного диода из-за ограниченного коэффициента теплопередачи с кристалла на корпус.

Кроме изменения длины волны излучения от температуры, также меняется и модовый состав излучения. На рис. 6 представлены спектры оптического излучения лазерного диода для мощности 120 мВт при значениях температуры 20, 30 и 40 °C.

Как видно из приведённого графика, при росте температуры у данного диода происходит разделение спектра излучения на два отдельных пика, при этом большая мощность излучения наблюдается в правом пике. Затем пики снова сближаются и спектр становится похожим на исходный.

По результатам измерений длин волн данного лазерного диода для номинальной мощности 120 мВт и температуры стабилизации 40 °C центральная длина волны фильтра

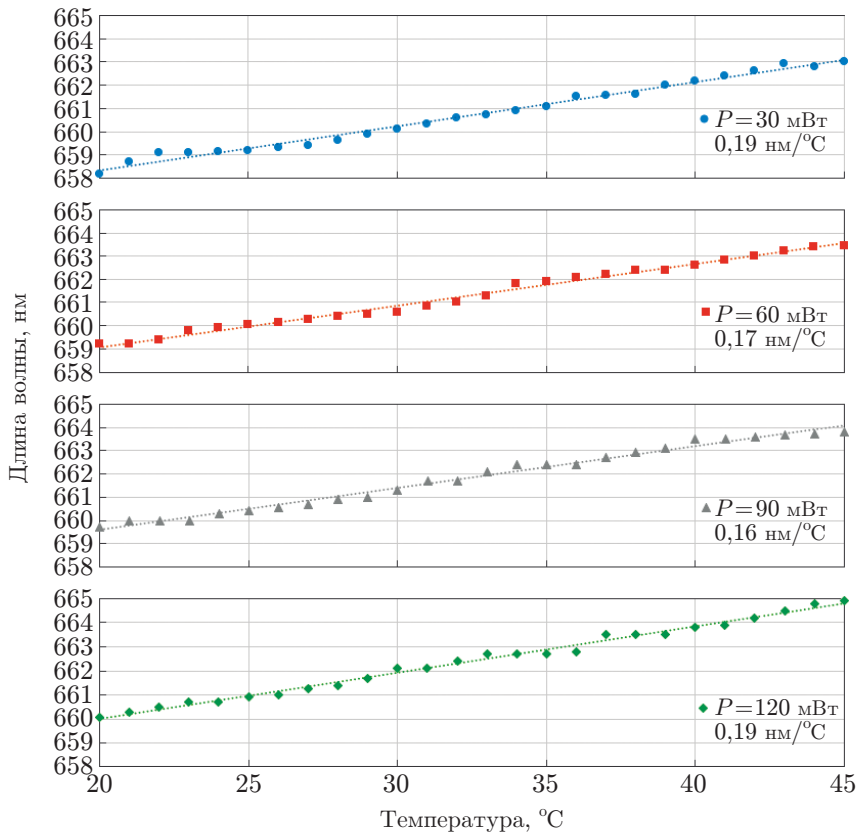


Рис. 5. Зависимость длины волны лазерного диода от температуры при различной потребляемой мощности

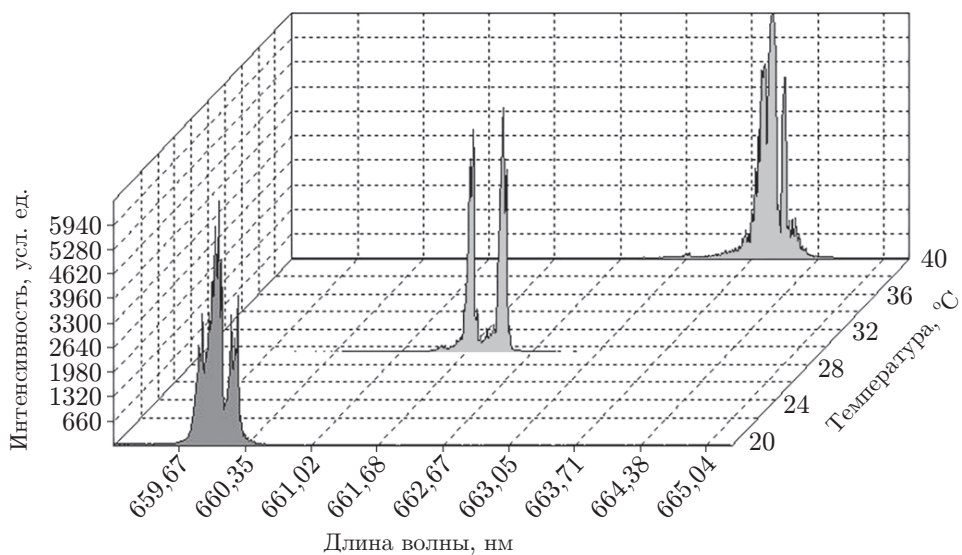


Рис. 6. Спектры оптического излучения лазерного диода (мощность 120 мВт)

должна быть  $664 \pm 2$  нм. Однако фильтров с такой центральной длиной волны нет в модельных рядах основных производителей фильтров. А фильтр с центральной частотой 660 нм и FWHM (full width at half magnitude), равной 10 нм, будет вносить сильное ослабление принимаемого сигнала (до 80 % от максимума пропускания). Использовать же меньшую температуру стабилизации лазерного модуля не получится в жаркие дни, когда сами ЛДА прогреваются до температур порядка  $40^\circ\text{C}$ . Кроме того, работа лазерного модуля в районе  $30^\circ\text{C}$  нежелательна из-за раздвоения спектра оптического излучения.

Выходом из данной ситуации может быть снижение мощности оптического излучения до величин 90–100 мВт, что даст суммарное ослабление сигнала на уровне 30 %. Либо возможно использование фильтра с FWHM, равной 20 нм. Это ухудшит подавление оптического излучения от лазера на длине волны 638 нм до  $10^2$  раз вместо  $10^4$ . Однако такого подавления, возможно, будет достаточно при одновременном использовании с поляризационным фильтром.

Таким образом, установлено, что данный полупроводниковый лазерный диод может быть использован в лазерном доплеровском анемометре с применением оптической фильтрации.

**Заключение.** В работе выполнены экспериментальные исследования смещения длины волны полупроводникового лазерного диода на 660 нм в зависимости от температуры и от мощности лазерного излучения. Показано, что для данного образца лазерного диода температурный дрейф длины волны лежит в пределах  $0,2 \text{ нм}/^\circ\text{C}$ .

Это накладывает ограничения на температурный диапазон работы данных диодов, и делается вывод о необходимости температурной стабилизации оптического модуля в случае использования узкополосных оптических фильтров.

Таким образом, применение данных диодов в лазерных доплеровских анемометрах с хроматическим разделением каналов возможно, но требует термостабилизации оптического излучателя и более тщательного выбора центральной длины волны и полосы пропускания полосового оптического фильтра перед фотоприёмником.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Дубнищев Ю. Н., Арбузов В. А., Белоусов П. П., Белоусов П. Я. Оптические методы исследования потоков. Новосибирск: Сибирское университетское издательство, 2003. 418 с.
2. Дубнищев Ю. Н., Ринкевичюс Б. С. Методы лазерной доплеровской анемометрии. М.: Наука, 1982. 304 с.
3. Meledin V., Anikin Yu., Bakakin G. et al. Laser Doppler diagnostic of flow in draft tube behind hydroturbine runner // *Turbomachines: Aeroelasticity, Aeroacoustics, and Unsteady Aerodynamics*. Moscow: Torus Press Ltd., 2006. P. 446–457.
4. Shtork S. I., Comas O., Fernandes E. C., Heitor M. V. Aerodynamic structure of unsteady swirling flow downstream of a sudden expansion // *Thermophys. and Aeromechanics*. 2005. **12**, N 2. P. 217–228.
5. Dancey C. L. A review of three component laser Doppler anemometry // *Journ. Opt. Sensors*. 1987. N 2. P. 437–469.
6. Olcmen S. M., Simpson R. L. A five-velocity component laser Doppler velocimeter for measurements of a three-dimensional turbulent boundary layer // *Meas. Sci. Technol*. 1995. N 6. P. 702–716.
7. James S. W., Tatam R. P., Elder R. L. Design considerations for a three dimensional fiber optic laser Doppler velocimeter for turbomachinery applications // *Rev. Sci. Instrum*. 1997. **68**, Iss. 8. P. 3241–3246.



8. **Mouaze D., Belorgey P. M.** Internally mounted laser-Doppler-anemometry system for boundary layer measurement // Exp. in Fluids. 2001. **30**, N 1. P. 111–114.
9. **Rakhmanov V. V., Kulikov D. V.** The analysis of applicability of the refractive-index-matching method for flow investigation by LDA method in models of the fire chambers of complex geometry // EPJ Web of Conferences. 2014. **76**. P. 4.
10. **Premium Hard-Coated Bandpass Filters.** THORLABS. URL: [https://www.thorlabs.com/newgrouppage9.cfm?objectgroup\\_id=1860](https://www.thorlabs.com/newgrouppage9.cfm?objectgroup_id=1860) (дата обращения: 04.05.2022).
11. **Трёхкомпонентная (3D) лазерная доплеровская измерительная система (ЛДИС) ЛАД-056.** Институт оптико-электронных информационных технологий. Продукция. URL: <http://www.ioit.ru/3d.htm#3d> (дата обращения: 27.04.2022).
12. **Liao Y. R., Li J. J., Mi G. X. et al.** An experimental study on the temperature characteristic of a 940 nm semiconductor laser diode // Opt. and Photon. Journ. 2016. **6**, N 8B. P. 75–82.

*Поступила в редакцию 12.04.2022*

*После доработки 28.04.2022*

*Принята к публикации 18.05.2022*

---