

УДК 631.396.6

© Э. Г. Силькис, А. С. Станкевич, В. Н. Крашенинников, Д. В. Новиков, 2020

ИЗМЕРИТЕЛЬ ДЛИНЫ ВОЛНЫ ЛАЗЕРНЫХ ДИОДОВ В ОБЛАСТИ 330–1080 НМ

Разработан недорогой измеритель длины волны лазерных диодов (ЛД) в области 330–1080 нм. В состав измерителя входят мини-спектрометр МС-300 и лампы с полым катодом (ЛПК). В спектрометре одновременно регистрируются излучения лазерного диода и ЛПК. С помощью линий нормалей первого и второго порядка дифракции вблизи указанной точки спектрального диапазона с максимально возможной точностью калибруется спектральная шкала. От числа линий нормалей вблизи линии излучения ЛД зависит точность измерения его длины волны, она может составлять 0.001 нм и менее. Программа системы регистрации спектрометра ведет поиск исследуемой линии в заданном спектральном диапазоне, определяет центр тяжести контура этой линии и ее полуширину, отображает эти параметры на информационном табло.

Кл. сл.: лампа с полым катодом, система регистрации на линейном ПЗС, мини-спектрограф, длина волны спектральной линии, лазерный диод

ВВЕДЕНИЕ

При необходимости точно настроить излучение лазерных диодов на определенную длину волны или произвести их отбраковку в определенном узком диапазоне длин волн требуется измерять длину волны их генерации с определенной точностью. Измерители длин волн на специализированных спектрометрах с решетками типа эшелле, например SHR [1], позволяют реализовать точность измерения порядка 0.003 нм. Разработан недорогой измеритель длин волн лазерных диодов на основе мини-спектрометра типа МС-300 с системой регистрации МОРС-1 на линейном ПЗС [2] с точностью измерения длины волны на уровне 0.001–0.002 нм. Такая точность достигается: созданием спектральной шкалы с помощью линий нормалей [3] газоразрядных источников излучения с низким давлением паров (в частности, ЛПК); одновременным измерением нужного участка спектра излучения ЛПК и лазерного диода; программой определения центра тяжести (ЦТ) контура линии лазерного диода; коррекцией спектральной шкалы в процессе измерения; усреднением 20 последовательных единичных измерений длины волны. Точность измерения в основном зависит от количества линий нормалей на участке спектра шириной 5–7 нм в окрестности измеряемой линии [4] и от дисперсии мини-спектрографа МС-300.

Преимуществом созданного измерителя по сравнению с измерителем на основе эшелле-решетки [1] является одновременность регистрации излучения источника линейчатого спектра и диодного лазера и определение значения длины волны для каждого единичного измерения с авто-

матической корректировкой спектральной шкалы каждого измерения. В измерителе с эшелле-решеткой необходимо достаточно часто выполнять перекалибровку прибора, т.к. измерение длины волны исследуемого лазерного излучателя производится в другой момент времени и вследствие температурного дрейфа точность измерения со временем утрачивается.

Разработанная методика и программа измерения являются универсальными, измеритель может работать с разными источниками линейного спектра, их подбор (число линий нормали в окрестности измеряемой линии и отсутствие спектральных помех вблизи нее) повышает точность измерения. В частности, такой источник, как водородная лампа ДВС-25 [5], в диапазоне 330–1080 нм имеет более 2300 регистрируемых на МС-300 линий H_2 и может использоваться для измерений длины волны в любой точке этого спектрального диапазона.

АППАРАТНО-ПРОГРАММНЫЙ КОМПЛЕКС ДЛЯ ИЗМЕРЕНИЯ ДЛИНЫ ВОЛНЫ

На рис. 1 изображена блок-схема измерителя длины волны. Излучение ЛД направляется с помощью юстируемого поворотного зеркала на входной торец одножильного волоконно-оптического световода мини-спектрографа МС-300. Одновременно на этот же торец световода посредством объектива 4 и полупрозрачного зеркала 5 проецируется и излучение ЛПК. Объектив ЛПК позволяет проецировать на торец световода с диаметром жилы 400 мкм пятно диаметром порядка 2 мм.

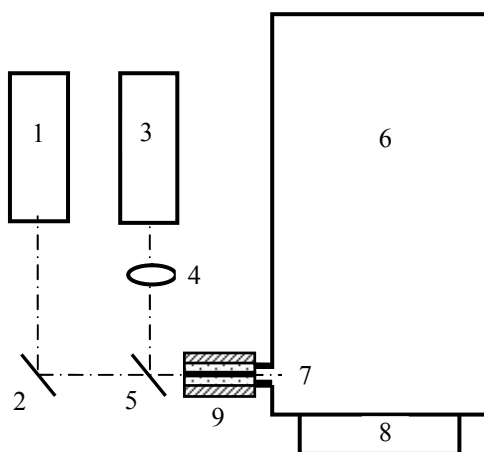


Рис. 1. Блок-схема "Измерителя длины волны лазерных диодов".

1 — лазерный диод, 2 — поворотное зеркало, 3 — лампа с полым катодом типа ЛТ-2, 4 — фокусирующий объектив, 5 — полупрозрачное зеркало, 6 — мини-спектрограф типа МС-300, 7 — входная щель мини-спектрографа, 8 — система регистрации МОРС-1 на линейном ПЗС, 9 — волоконно-оптический световод

Рабочий спектральный диапазон МС-300 с дифракционной решеткой 1800 штр/мм (330–950 нм) позволяет анализировать длину волны примерно 15 различных типов лазерных диодов. Для расширения диапазона в красную область спектра до 1100 нм в мини-спектрограф МС-300 устанавливается дифракционная решетка 1200 штр/мм. Прибор МС-300 оснащается системой регистрации МОРС-1, в которой в качестве фотоприемника используется линейный прибор с зарядовой связью (ПЗС) типа TCD1304DG, линейный размер чувствительной зоны которого — 29,2 мм, размер элемента (пикселя) ПЗС — 8×200 мкм, количество рабочих пикселей — 3648. Мини-спектрограф МС-300 с решеткой 1800 штр/мм имеет обратную линейную дисперсию 1,31 нм/мм для средней области рабочего спектрального диапазона, одновременно регистрируемый участок спектра составляет 38 нм. Программное обеспечение (ПО) системы регистрации МОРС-1 позволяет получать и обрабатывать спектральную информацию.

В типовое ПО системы регистрации МОРС-1 были введены новые опции: автоматическая коррекция спектральной шкалы каждого единичного измерения, оценка длины волны и полуширины линии излучения ЛД по откорректированной шкале и индикация этих параметров на информационном табло, определение и индикация на табло ошибки измерения длины волны контрольной линии. Параметры излучения ЛД индицируются с периодом примерно в 1 с, отображаются или значения единичных измерений, или усредненные данные по 20 "последним" единичным циклам измерений.

ПРИМЕР РЕГИСТРАЦИИ ПАРАМЕТРОВ ИЗЛУЧЕНИЯ ЛАЗЕРНОГО ДИОДА ТИПА GH0781JA2C

Работу измерителя длин волн проиллюстрируем примером регистрации параметров излучения лазерного диода типа GH0781JA2C для произвольной спектральной "точки" диапазона перестройки 779,7–787 нм.

Суммарный спектр ЛПК Fe-Ne и ЛД на участке 777–786 нм приведен на рис. 2 (экран ПО системы регистрации цветной, поэтому используется цветовая разметка элементов в описании). На этом участке регистрируются, помимо лазерной линии λ_d в области 786,0 нм, 12 линий Fe второго порядка дифракции. На всех спектрах, представленных в статье, измеряемая и контрольная линии маркируются надписями λ_d и λ_k соответственно, а реперные линии — по наименованию элементов (Ne, Fe, Cr, Cu).

Следует отметить, что при выбранном токе инжекции диодного лазера его линия генерации не совпадает ни с одной из линий Fe (отсутствие помехи). По центрам тяжести 9 реперных линий Fe, индицированных рисками нижней шкалы, выполнялась калибровка шкалы длин волн для данного спектрального участка.

Калибровка осуществлялась по методу наименьших квадратов с выбором оптимальной степени полинома формулы спектральной шкалы. Программа определяет центр тяжести (ЦТ) контура каждой реперной линии, при этом контур снизу

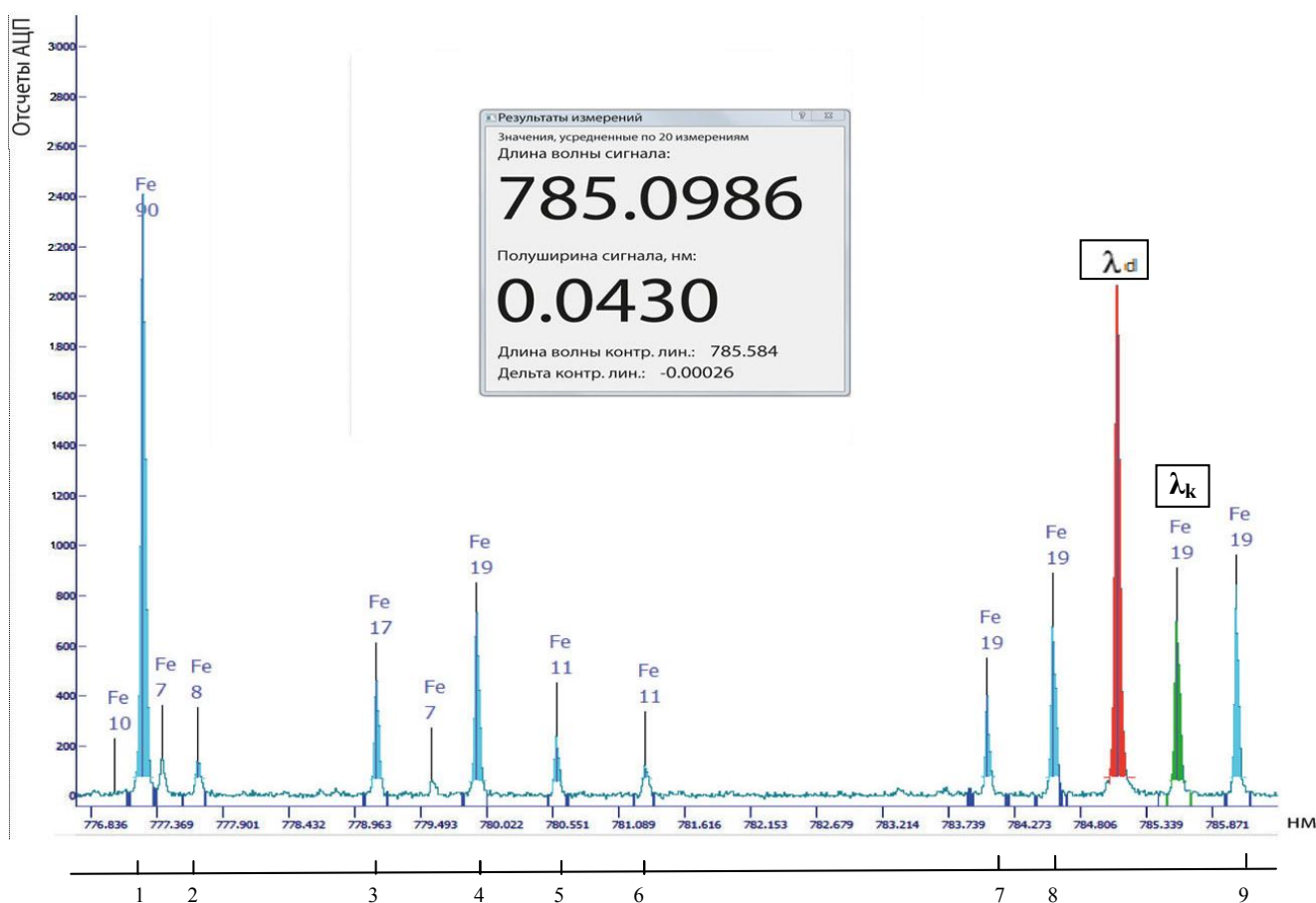


Рис. 2. Участок суммарного спектра излучения ЛПК Fe-Ne и лазерного диода GH0781JA2C в диапазоне длин волн 777–786 нм. Нижняя шкала с рисками 1–9 — маркировка реперных линий

ограничен уровнем отсечки амплитуды линии выбором в ПО множителя среднеквадратичного отклонения амплитуды шума около реперной линии.

На экране ПО красным цветом закрашена измеряемая линия ЛД (λ_d), зеленым цветом — наиболее близкая к линии ЛД контрольная линия Fe2 785.5840 нм (на рис. 2 эти линии маркированы надписями соответственно λ_d и λ_k). Цвет закраски реперных, соответственной и измеряемой линий определен в ПО и, естественно, одинаков для всех спектров в данной статье.

В ПО системы регистрации МОРС-1 база линий сформирована с помощью современного электронного справочника NIST [6], в котором длины волн атомных линий приводятся в нм с точностью до 3–4-го знака после запятой. ЦТ контура каждой реперной линии присваивается значение длины волны этой линии, и затем вычисляется спектральная шкала. Спектр излучения ЛПК с этой шкалой запоминается как спектр-аналог (опция ПО). В созданной спектральной шкале спектра-

аналога ЦТ для каждой из реперных линий, используемой для калибровки шкалы, проверяется ее отклонение от своего значения по базе линий (проверяемая линия не используется в калибровке шкалы). Эта процедура используется для перепроверки созданной базы линий. Измеренные величины отклонений — менее 0.001 нм.

Для постоянного контроля параметров излучения ЛД применяется циклический режим работы системы регистрации, при котором единичные циклы накопления и считывания сигнала с ПЗС следуют друг за другом. Длительность единичного цикла составляет 500–1000 мс. Каждый новый цикл измерения сохраняется в оперативной памяти как отдельный спектральный файл. Программа определяет ЦТ реперных линий в каждом файле (они могут быть сдвинуты вследствие температурного дрейфа спектральной шкалы) и сравнивает с файлом спектра-аналога, в случае сдвига производится автоматическая коррекция спектральной шкалы для поддержания первоначальной точности измерения.

РЕЖИМ РАБОТЫ ПО ПРИ ПРОВЕДЕНИИ ИЗМЕРЕНИЙ

Спектр-аналог излучения ЛПК создается (или уточняется) перед измерением. Выбирается нужная длительность цикла для работы с максимально возможными по амплитуде реперными линиями. По сдвигу контрольной линии (индикация на информационном табло) уточняется возможная точность измерения. Регулировкой тока линию ЛД устанавливают на нужную длину волны, пользуясь показаниями табло (в режиме циклической индикации показаний).

Уточняют значение длины волны путем усреднения 20 последовательных измерений (опция ПО). Производится измерение значения полуширины линии (также по этим же 20 измерениям).

При уходе шкалы на 8–9 пикселей ПЗС фиксируется откорректированный по шкале спектр, и он запоминается оператором как новый спектр-аналог. Дальнейшие измерения продолжаются с использованием обновленного спектра-аналога.

ВЫБОР ИСТОЧНИКА ЛИНЕЙЧАТОГО СПЕКТРА

Одним из важнейших компонентов комплекса является источник линейчатого спектра. Основные критерии для выбора источника следующие:

- участок спектра шириной 0.7–1.5 нм, в который попадает линия измеряемого ЛД, должен быть свободен от линий помех;
- на участке шириной 5–8 нм, включающем в себя участок с лазерной линией, должно быть не менее 6–8 реперных линий нормалей;
- желательно, чтобы интенсивности реперных линий находились в диапазоне 200–3000 отсчетов при оптимальной фокусировке излучения на торец световода и при длительности единичного измерения спектра 500–1000 мс.

В общем случае амплитуды реперных линий, а также контрольной линии и линии ЛД не должны выходить за пределы динамического диапазона системы регистрации 10–4200 отсчетов. Например, при применении ЛПК Fe-Ne для измерения длины волны ЛД с диапазоном возможной перестройки 779.7–787.0 нм рабочими спектральными участками без помех могут быть участки 781.49–783.81 и 784.7–785.4 (рис. 2).

При выборе излучателя для измерения длины волны ЛД типа GH0781JA2C были исследованы спектры еще 4 источников излучения с низким давлением паров: ЛПК Cr-Ne, ЛПК Cu-Ne, газоразрядной лампочки Ar-Ne и водородной лампы ДВС-25, спектры которых показаны в Приложении на рис. П1, П2. В спектре ЛПК Fe-Ne (рис. 2), например, есть достаточно яркая линия Fe2

779.9414, которая является помехой при измерении длины волны ЛД в диапазоне 779.5–780.5 нм. Поэтому для измерений в этом диапазоне можно использовать ЛПК Cr-Ne (Приложение, рис. П1), которая не дает линий помех в диапазоне 778.8–780.5 нм. Необходимо отметить, что линии Cr2 (линии Cr второго порядка дифракции на рис. П1) не являются линиями нормалей, как, в частности, линии Fe и Ne в ЛПК Fe-Ne. Длины волн, необходимых для наших измерений линий Cr, приведенные в справочнике NIST в нм с точностью до 3–4 знаков после запятой, были перепроверены по схеме рис. 1, где вместо диодного излучателя располагалась ЛПК Fe-Ne. Шкала калибровалась по линиям нормалей Fe2 и Ne и затем определялись ЦТ линий Cr; расхождений с NIST по этим линиям более 0.001 нм не обнаружено.

Спектр ЛПК Cu-Ne (Приложение, рис. П2, а) не содержит достаточного числа линий для диапазона 780–782 нм; на участке 782–784 нм — 4 линии помехи; в диапазоне 784–786 нм измерения возможны, но точность будет хуже 0.002 нм.

В газоразрядной лампе низкого давления Ar-Ne (Приложение, рис. П2, б) вообще нет линий нормалей в диапазоне 780–785 нм.

Водородная лампа ДВС-25 (рис. П2, в) обладает богатым спектром не только на интересующем нас спектральном участке, но и в диапазоне 330–1080 нм, что обеспечивает высокую точность измерения во всем этом широком диапазоне. Но одновременно с этим из-за большого количества линий практически нет спектральных участков без линий помех. В случае совпадения линий источника линейчатого спектра и ЛД необходимо работать с существенным превышением амплитуды линии ЛД по сравнению с амплитудой линии помехи, а также вводить подпрограмму учета интенсивности линии помехи (т.е. такой вариант работы тоже возможен, если нет альтернативы излучателю с линиями помех на нужном участке измерения).

Большое количество линий ДВС-25 позволяет оценить точность измерения длины волны при конкретной постановке реперов (например, на спектре рис. 2) и конкретном значении измеряемой длины волны ЛД, расположенной между двумя близкими к ЛД реперными линиями. (Частично эта оценка проводится для контрольной линии, также близкой к ЛД и не участвующей в калибровке спектральной шкалы.) Реперы на спектре ДВС-25 в нужной области спектра ставятся на линии H₂, близкие к реперным; выбирается линия H₂, близкая к измеряемой линии на спектре; производится измерение длины волны этой линии H₂ как неизвестной; определяется сдвиг ЦТ контура этой линии относительно значения в базе линий. Длины волн H₂ приведены в [7] в нм с точностью 3–4 знака после запятой; в работе [5] нами были измере-

ны более 2300 одиночных линий с точностью 0.001 нм на спектрографе ПГС-2. Поэтому величина сдвига ЦТ контура "неизвестной" линии H_2 при проведении такого измерения позволяет оценить точность измерения в спектральном промежутке между двумя близкими реперными линиями. Практические оценки качества калибровки спектральной шкалы показали, что сдвиг ЦТ контура неизвестной линии находится в пределах 0.001–0.0015 нм.

ПРИМЕРЫ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ ОПИСЫВАЕМОЙ СИСТЕМЫ ДЛЯ ИЗМЕРЕНИЙ ДЛИН ВОЛН ЛАЗЕРНЫХ ИЗЛУЧАТЕЛЕЙ

Измерение длины волны ЛД типа GN0781JA2C в разных точках перестройки его спектрального диапазона

Изменение длины волны осуществлялось вариацией тока через диод; выбирались область, свободная от помех со стороны линий нормалей

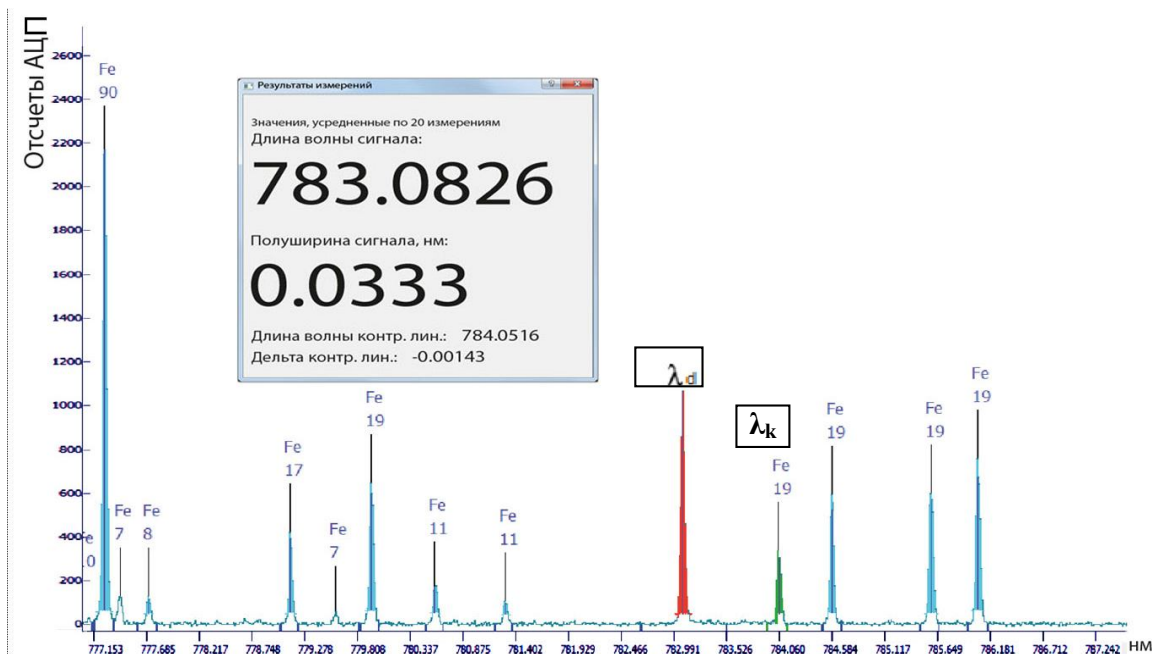
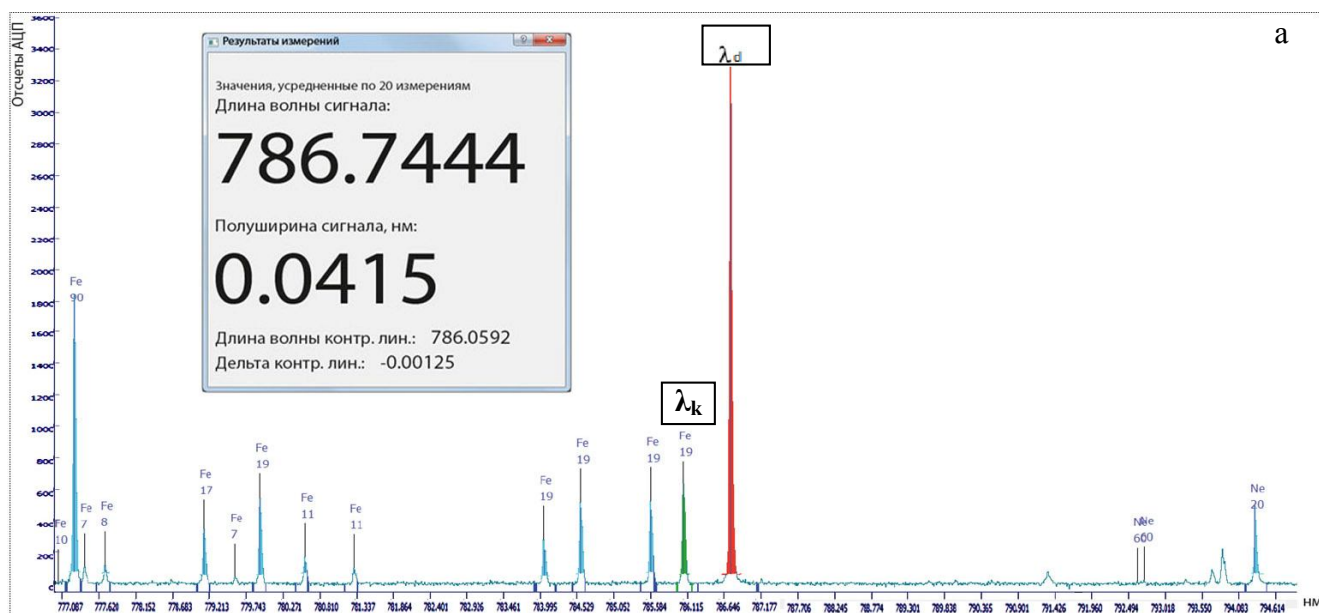


Рис. 3. Измерение длины волны лазерного диода GN0781JA2C с помощью ЛПК Fe-Ne.
а — в спектральной точке 786.7444 нм, б — в спектральной точке 783.0826 нм

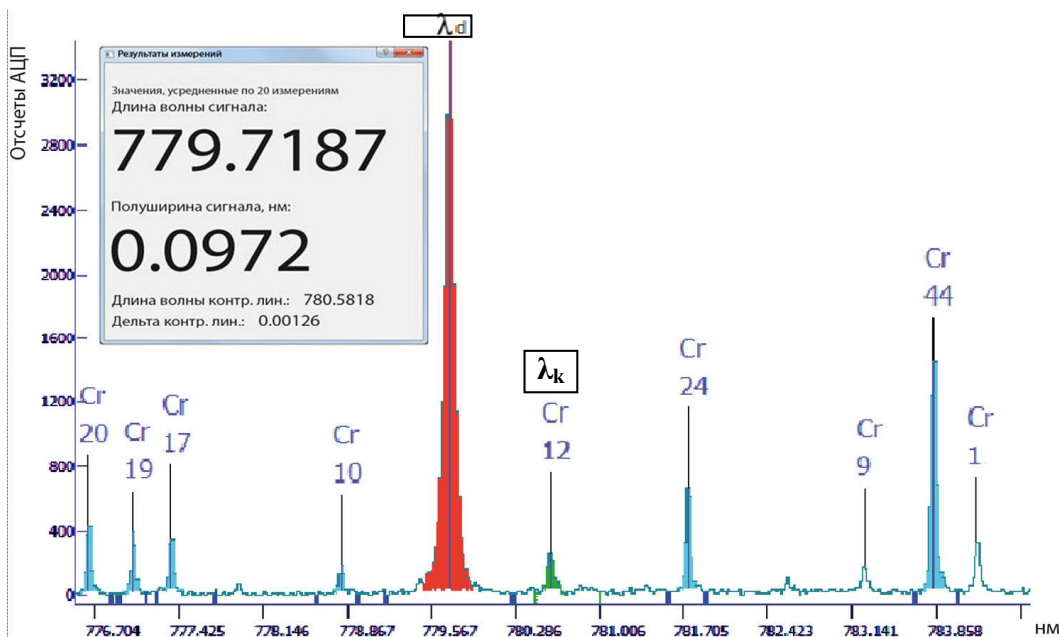


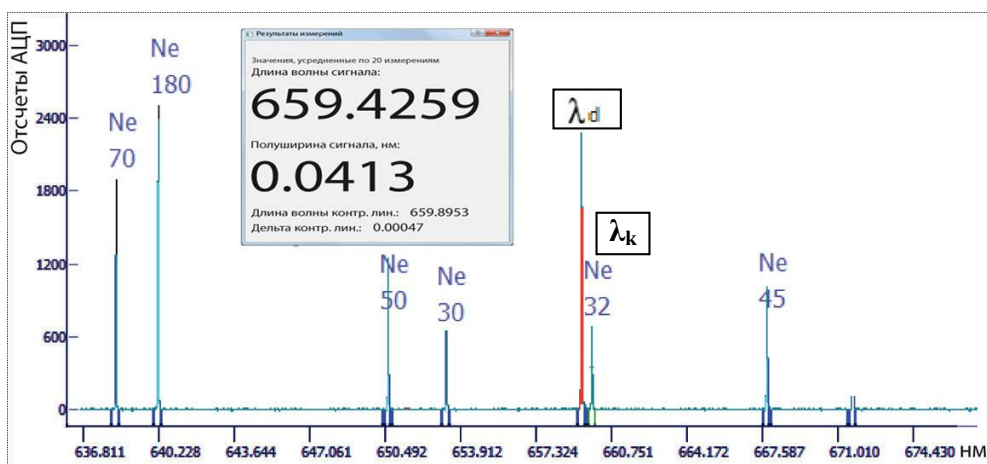
Рис. 4. Измерение длины волны лазерного диода GH0781JA2C с помощью ЛПК Cr-Ne в спектральной точке 779.7187 нм

ЛПК, и тип ЛПК. На рис. 3, 4 продемонстрирован результат измерения длины волны излучения ЛД в трех точках диапазона его перестройки. В точках 786.7444 нм (рис. 3, а) и 783.0826 нм (рис. 3, б) применяется ЛПК Fe-Ne; набор реперных линий и контрольной линии несколько другой, чем при измерении в спектральной точке 785.0986 (рис. 2). В длинноволновой части спектра реперной линией (рис. 3, а) является удаленная линия Ne 794.3180, тем не менее сдвиг ЦТ контура контрольной линии Fe2 786.0592 составляет всего 0.00125 нм. Рис. 4 демонстрирует измерение длины волны излучения ЛД в точке 779.7187 нм, источник — ЛПК Cr-Ne, сдвиг ЦТ контура контрольной линии Cr2

780.5818 — 0.00126 нм. ЛПК Cr-Ne была выбрана для измерения в этой спектральной точке, т.к. в области 779.0–780.2 нм не имеет линий помех в отличие от ЛПК Fe-Ne.

Измерение длины волны излучения лазерного диода типа ADL-66801DL, паспортное значение длины волны 660 нм

Это измерение проводилось по шести реперным линиям во всем спектральном диапазоне одного ПЗС (636.7–677.5 нм) (рис. 5). Длина волны излучения ЛД определена как 659.4259, сдвиг ЦТ контура контрольной линии Ne 659.8953 нм (на рис. 5 обозначена как Ne32) составлял 0.00047 нм.



Измерение длины волны излучения ЛД типа "Cobolt Samba"

ЛД типа "Cobolt Samba" является стабилизированным по длине волны источником излучения со следующими паспортными данными: длина волны 532.1 ± 0.3 нм; стабильность 0.002 нм в те-

чение 8 ч работы; спектральная ширина линии — менее 1 МГц. Для измерения его длины волны был выбран участок спектра 500–547 нм спектрометра MC-300, в качестве источника линейчатого спектра использовалась ЛПК Fe-Ne со свободной от помех областью 532.0–532.3 нм.

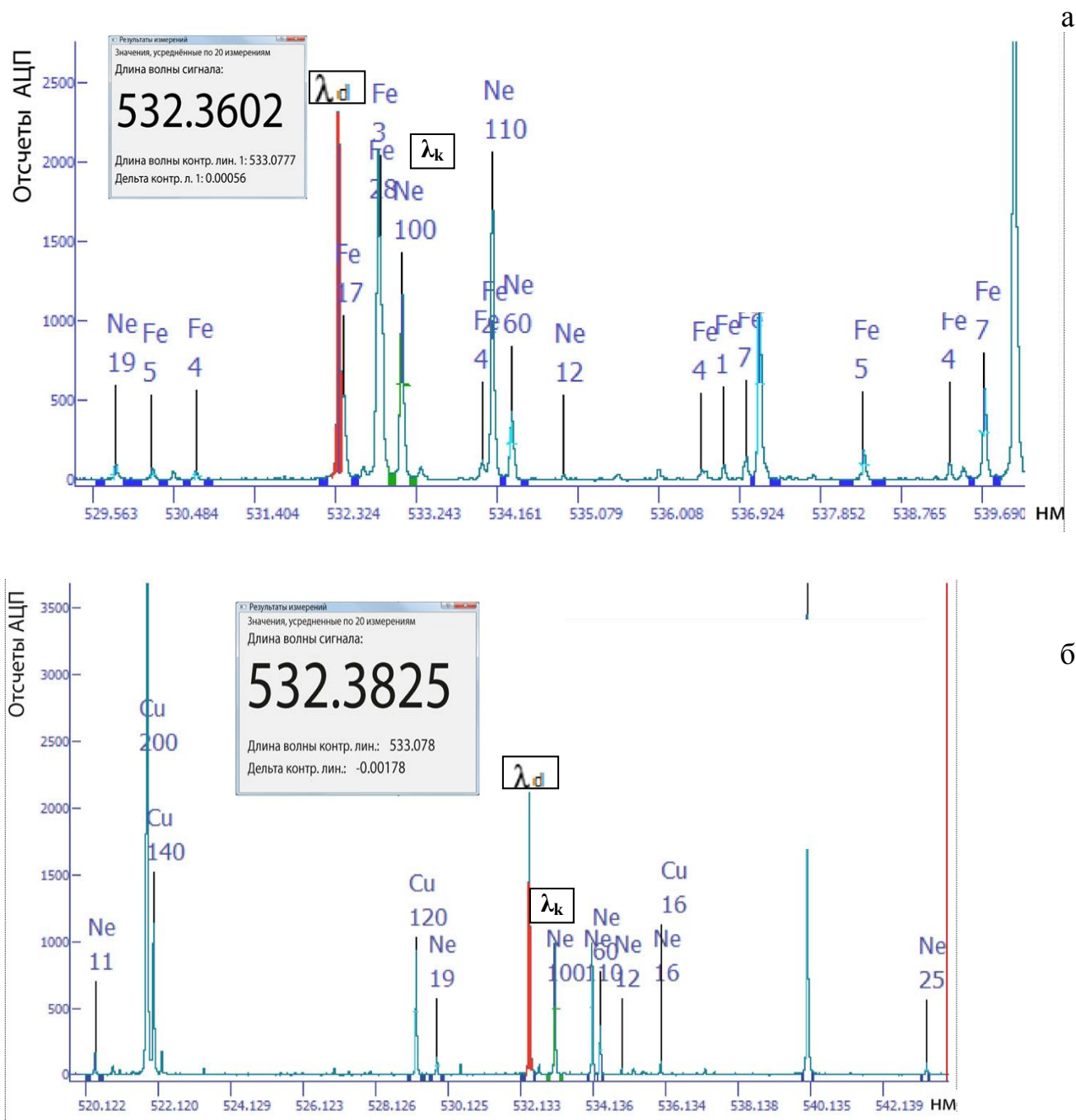


Рис. 6. Измерение длины волны лазерного диода "Cobolt Samba".

Результаты измерения на табло; а — область спектра 529–540 нм спектрометра MC-300, ЛПК Fe-Ne; б — область спектра 530–542 нм спектрометра MC-300, ЛПК Cu-Ne

Однако предварительные измерения показали, что длина волны излучения лазера находится вблизи значения 532.3602 нм (спектр на рис. 6, а) и линия Fe 632.418 мешает ее точному измерению, а также отсутствует близко расположенная к лазерной линии контрольная линия; спектрально неразрешенные линии Fe 532.804 и Fe 532.853 нм в качестве контрольных не подходят. Для более точного измерения длины волны излучения ЛД была выбрана ЛПК Cu-Ne (спектр на рис. 6, б) со свободным от помех участком спектра 531.8–532.4 нм, близкой контрольной линией Ne 533.078 нм и с шестью реперными линиями на участке 520–543 нм. По результатам измерения с этой ЛПК длина волны линии ЛД определена как 532.3825, измеренный сдвиг ЦТ контура контрольной линии менее 0.002 нм. Помеха при измерении длины волны излучения ЛД с помощью ЛПК Fe-Ne приводила к ухудшению точности до 0.02 нм. Измеренная длина волны лазерного диода находится в пределах паспортного значения 532.1 ± 0.3 нм. Двухчасовые измерения подтвердили, что при точности измерения не хуже 0.002 нм стабильность длины волны излучения ЛД соответствует паспортным данным. Полуширина линии излучения диода не может быть измерена, т.к. она существенно меньше аппаратной функции МС-300 (порядка 0.036 нм в этой области спектра), поэтому данные по полуширине исключены из табло.

Измерение длины волны юстировочного He-Ne лазера типа ЛГ66

Представлялось интересным оценить возможности применения разработанного аппаратного комплекса для измерения длины волны He-Ne лазера. Для лазера ЛГ66 в паспорте указано очень заниженное по точности значение длины волны излучения 632.8 нм. Генерация излучения He-Ne лазера возможна на любой частоте в пределах доплеровского контура линии Ne 632.81646 нм шириной 1500 МГц [8]. Для случая распространения излучения в воздухе при нормальных условиях результат наших измерений длины волны излучения He-Ne лазера должен укладываться в диапазон 632.8153–632.8174 нм с учетом ошибки измерения.

Известен пакет из 20 ярких линий Ne в диапазоне 585–730 нм (некоторые из них использовались для измерения длины волны лазерного диода в точке 659 нм, см. рис. 5), и их можно было бы использовать для измерения длины волны He-Ne лазера. Однако для реализации точности на уровне 0.001 нм нужны реперные линии вблизи измеряемой линии генерации лазера. Наличие таких линий с достаточной амплитудой может обеспечить ЛПК Fe-Ne при определенном режиме ее работы и юстировке пятна излучения на торец волновода (рис. 7, 8) для использования в качестве реперных

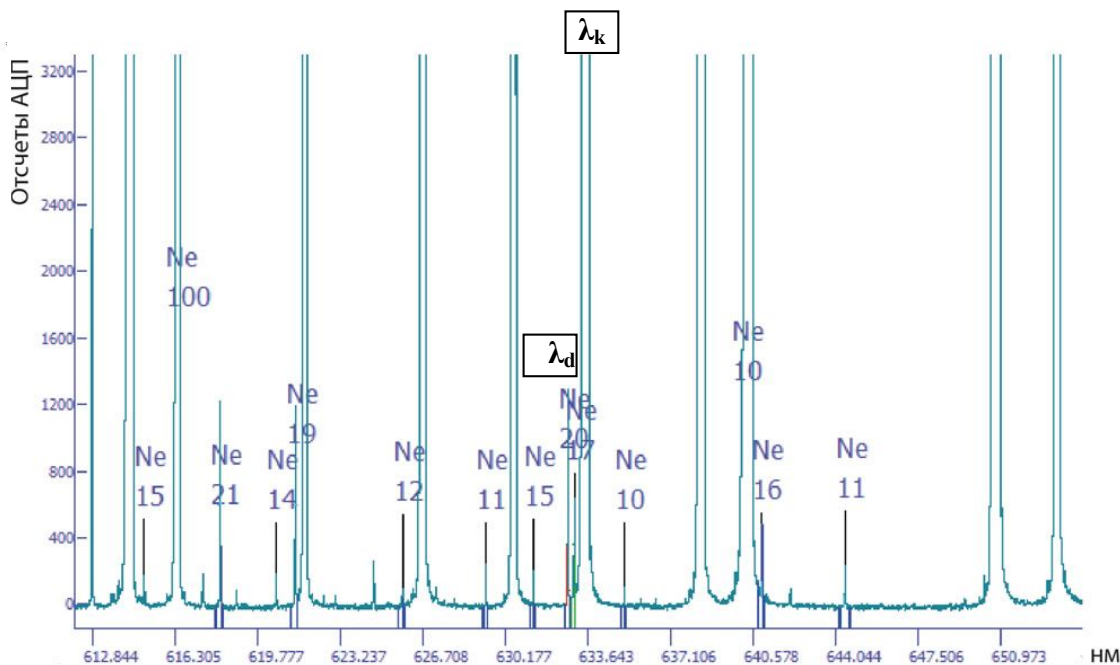


Рис. 7. Суммарный спектр излучения лазера He-Ne (типа ЛГ66) и ЛПК Fe-Ne в области 612–651 нм

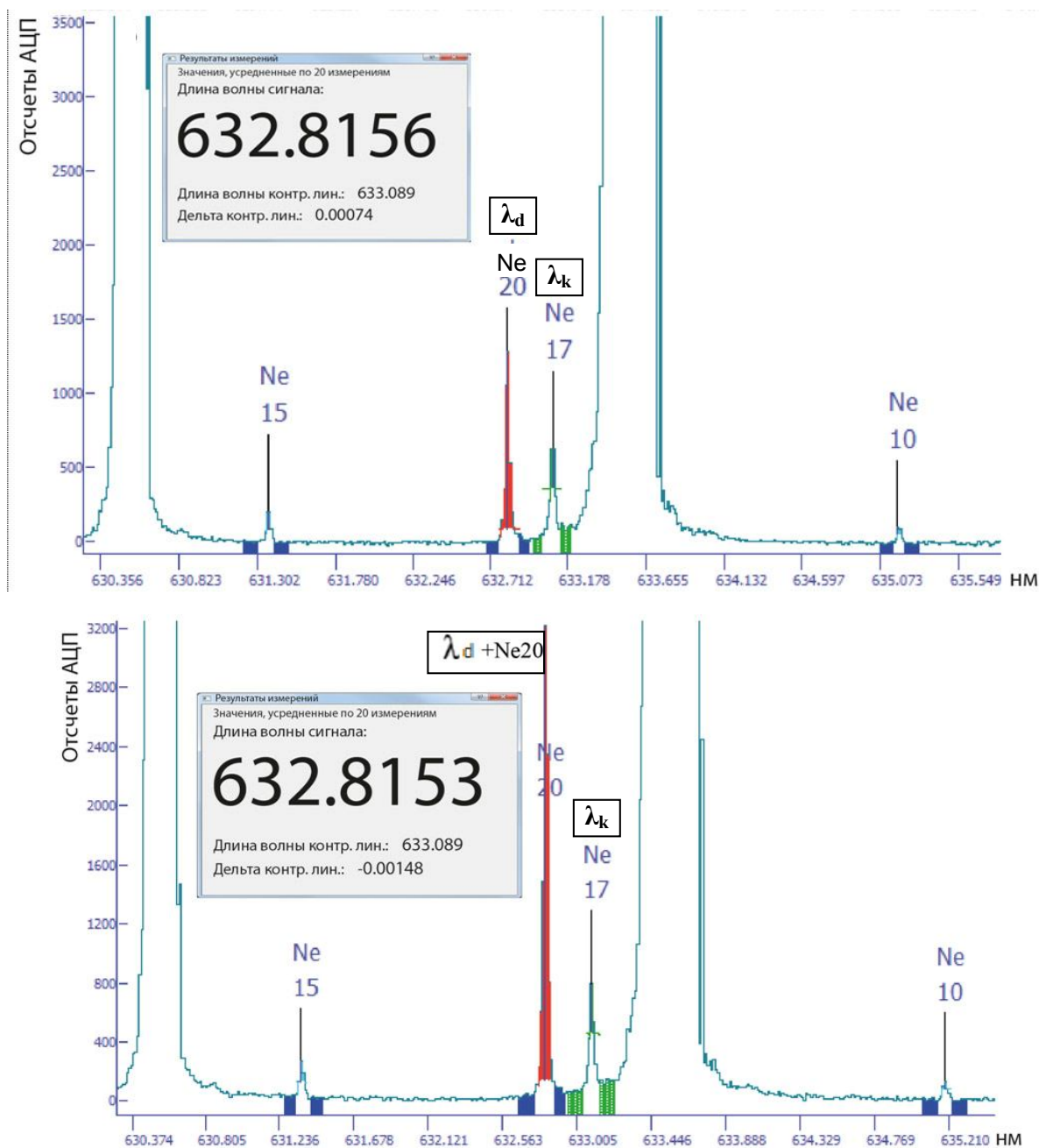


Рис. 8. Измерение длины волны лазера He-Ne с помощью ЛПК Fe-Ne.

а — спектр ЛПК Fe-Ne в области 630–636 нм, на табло результаты измерения линии Ne 20 (Ne 632.8164) и сдвиг контрольной линии Ne 17 (Ne 633.089 нм); б — суммарный спектр ЛПК Fe-Ne и лазера He-Ne в области 630–636 нм, на табло — измеренное значение длины волны ЛГ66

линий относительно слабых по амплитуде линий Ne; яркие линии Ne регистрируются при этом в режиме "перегрузки" по динамическому диапазону. Предварительно, по измерению длины волны центра тяжести линии Ne 632.81646 нм, в пределах контура которой генерируется излучение He-Ne лазера (на рис. 7 и 8, а, обозначена как Ne 20),

проводилась оценка точности разработанного аппаратного комплекса. Интенсивность этой линии сопоставима по амплитуде с остальными восьмью реперными линиями (рис. 7, участок спектра 616–645 нм). На рис. 8, а, ее амплитуда составляет 1288 отсчетов, амплитуда контрольной линии Ne 633.0889 нм (на рис. 7 и 8, а, обозначена как Ne 17)

632 отсчета; амплитуды восьми реперных линий Ne находятся в пределах 300–1200 отсчетов. Реперные линии Ne 6313.685, 635.1853 и 636.4996 нм располагаются вблизи измеряемой и контрольной линий. На табло рис. 8, а, показана измеренная длина волны линии Ne 832.8156 нм, отклонение ЦТ контура этой линии от приведенного в NIST значения составило 0.0009 нм, при этом сдвиг ЦТ контура контрольной линии Ne 633.0889 нм относительно значения в базе NIST составляет 0.00074 нм. Таким образом, благодаря наличию близких реперных линий с достаточно высоким отношением сигнал/шум, продемонстрирована точность измерения не хуже 0.001 нм.

На рис. 8, б, показан этот же участок спектра с линией излучения лазера ЛГ66. В этом измерении амплитуда реперных линий была целенаправленно уменьшена в 1.5 раза для методической оценки ухудшения точности измерения. Сдвиг ЦТ контура контрольной линии Ne 633.0889 нм относительно значения NIST составил 0.00145 нм, т.е. точность ухудшилась. В этом измерении суммарная амплитуда линий лазера и Ne 632.81646 нм составила 3219 отсчетов (т.е. амплитуда лазерной линии примерно в 2 раза превосходит амплитуду линии Ne), измеренная длина волны суммарной линии — 632.8153 нм. Видно, что с учетом возросшей неточности измерения значение длины волны лазера находится в оцененном выше возможном диапазоне генерации He-Ne лазера.

ВЫВОДЫ

1. Создан экономичный измеритель длины волны лазерных диодов с точностью измерения 0.001–0.002 нм в любой точке спектральной области 330–1080 нм. Точность достигается созданием спектральной шкалы по центрам тяжести линий нормалей лампы с полым катодом в диапазо-

не измерения конкретной спектральной точки, одновременным измерением излучения ЛПК и лазерного диода, программой определения центра тяжести контура линии лазерного диода.

2. Разработанный измеритель длины волны с удобным программным обеспечением позволяет в режиме реального времени контролировать процесс вывода длины волны излучения лазерного диода на требуемую точку спектра. Визуализация длины волны и полуширины измеряемой линии ЛД, а также индикация сдвига контрольной линии (одной из линий нормалей) вблизи линии излучения диода, характеризующая точность измерения, обновляется с периодичностью порядка 1 с.

3. Подбор различных газоразрядных источников линейчатого спектра для измерения параметров излучения различных типов лазерных диодов в диапазоне 330–1080 нм сопряжен с поиском максимального количества линий нормалей вблизи измеряемой линии диода, отсутствием спектральных помех, искажающих контур линии излучения лазерного диода. Линии нормалей, используемые для калибровки спектральной шкалы спектрографа, должны регистрироваться с достаточно высоким соотношением с/ш (не менее 15–20).

4. В спектральной области 330–1080 нм достаточно универсальным источником линейчатого спектра для измерений длин волн лазерных диодов с точностью 0.001–0.002 нм может служить водородная лампа ДВС-25, имеющая наибольшую плотность линий (H_2) по сравнению с другими источниками излучения линейчатого спектра. В эту спектральную область попадают лазеры, излучающие в районе длин волн 404, 450, 488, 640, 760, 780, 808, 830, 850, 880, 905, 940, 975, 1064 нм. Однако в связи с большим количеством линий лампы ДВС-25 необходимо дополнить программу обработки регистрируемых спектров введением учета линии помехи.

ПРИЛОЖЕНИЕ

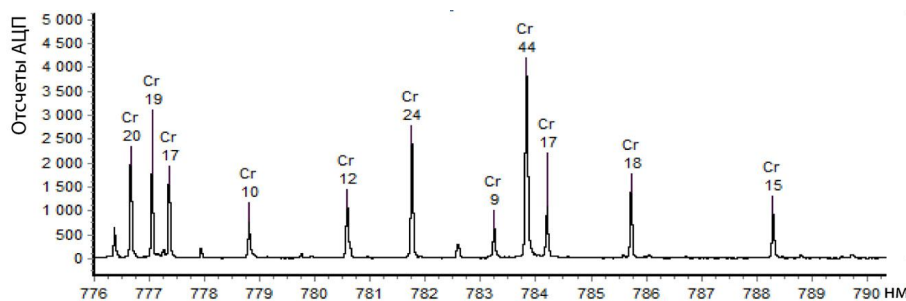


Рис. П1. Спектр ЛПК Cr-Ne в области 770–790 нм

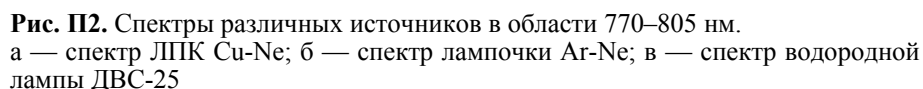


Рис. П2. Спектры различных источников в области 770–805 нм.
а — спектр ЛПК Cu-Ne; б — спектр лампочки Ag-Ne; в — спектр водородной лампы ЛВС-25

1. Высокоточный широкодиапазонный измеритель длины волны. Solar LS, Inc. URL: <https://solarlaser.com/devices/high-resolution-wide-range-wavelength-meter-shr/>
2. Силькис Э.Г., Станкевич А.С., Крашенинников В.Н. Системы регистрации спектров, миниспектрометры и эмиссионные спектрометры // Проблемы спектроскопии и спектрометрии. Вузовско-академический сб. научн. трудов. Вып. 33. Екатеринбург: УрФУ, 2014. С. 43–67.

3. Зайдель А.Н., Островская Г.В., Островский Ю.И. Техника и практика спектроскопии. М.: Наука, 1976. 392 с.
4. Силькис Э.Г., Станкевич А.С. Точность определения длины волны в спектрографах с помощью излучателя на лампе с полым катодом // 19-я научно-техническая конференция "Фотометрия и ее метрологическое обеспечение". Тезисы докладов. 2013. С. 118–122.
5. Силькис Э.Г., Станкевич А.С., Шоненков А.В. Атлас спектров газоразрядной лампы ДВС-25 в диапазоне 320–1100 нм // Аналитика и контроль. 2017. Т. 21, № 2. С. 103–115.

6. Atomic spectra database lines. National Institute of Standards and Technology (NIST). [Электронный ресурс]: URL: https://physics.nist.gov/PhysRefData/ASD/lines_form.html (дата обращения – август 2019 г.).
7. Crosswhite H.M. The hydrogen molecule wavelength tables of Gerhard Heinrich Dieke. Wiley Interscience, A Division of John Wiley & Sons, Inc, 1972. 325 p.
8. Карлов Н.В. Лекции по квантовой электронике. М.: Наука, 1988. 366 с.

Институт спектроскопии РАН, Троицк (Силькис Э.Г., Станкевич А.С., Крашенинников В.Н.)

ООО "Морс", Троицк (Новиков Д.В.)

Контакты: Силькис Эммануил Гершович,
esilkis@mail.ru

Материал поступил в редакцию 24.10.2019

LASER DIODE WAVELENGTH METER IN THE RANGE OF 330–1080 NM

E. G. Silkis¹, A. S. Stankevich¹, V. N. Krashenninnikov¹, D. V. Novikov²

¹*Institute of spectroscopy of RAS, Troitsk, Russia*

²*MORS ltd, Troitsk, Russia*

An inexpensive laser diode (LD) wavelength meter has been developed in the region of 330–1080 nm. The meter includes a MC-300 mini-spectrometer and hollow cathode lamps. The spectrometer simultaneously records the radiation of a laser diode and hollow cathode lamps. Using the normal lines of the first and second diffraction orders near the indicated point of the spectral range, the spectral scale is calibrated with the greatest possible accuracy. The accuracy of measuring wavelength of laser diode depends on the number of normal lines near the line of radiation of the LD, it can be 0.001 nm or less. The spectrometer registration system program searches for the studied line in a given spectral range, determines the center of gravity of the contour of this line and its half-width, displays these parameters on the information board.

Keywords: hollow cathode lamp, linear CCD recording system, mini-spectrograph, spectral line wavelength, laser diode

REFERENCES

1. *Vysokotochnyj shirokodiapazonnyj izmeritel dliny volny* [High-precision wide-band wavelength meter]. Solar LS, Inc. URL: <https://solarlaser.com/devices/high-resolution-wide-range-wavelength-meter-shr/>. (In Russ.).
2. Silkis E.G., Stankevich A.S., Krashenninnikov V.N. [Spectrum recording systems, minispectrometers and emission spectrometers]. *Problemy spektroskopii i spektrometrii. Vuzovsko-akademicheskij sb. nauchn. trudov* [Spectroscopy and spectrometry problems]. Ekaterinburg, UrFU Publ., 2014, is. 33, 43–67 p. (In Russ.).
3. Zaydel A.N., Ostrovskaya G.V., Ostrovskij Yu.I. *Tekhnika i praktika spektroskopii* [Spectroscopy Technique and Practice]. Moscow, Nauka Publ., 1976. 392 p. (In Russ.).
4. Silkis E.G., Stankevich A.S. [Accuracy of wavelength determination in spectrographs using a radiator on a hollow cathode lamp]. *19-ya nauchno-tehnicheskaya konferenciya "Fotometriya i ee metrologicheskoe obespechenie"*. Tesisy dokladov [19th Scientific and Technical Conference "Photometry and its Metrological Support." Theses of reports]. 2013. 118–122 pp. (In Russ.).
5. Silkis E.G., Stankevich A.S., Shonenkov A.V. [Atlas spectrum of gas discharge DVS-25 lamp in the range of 320–1100 nm]. *Analitika i kontrol* [Analytics and Control], 2017, vol. 21, no. 2, pp. 103–115. DOI: 10.15826/analitika.2017.21.2.003. (In Russ.).
6. Atomic spectra database lines. National Institute of Standards and Technology (NIST). URL: https://physics.nist.gov/PhysRefData/ASD/lines_form.html (accessed August 2019.).
7. Crosswhite H.M. *The hydrogen molecule wavelength tables of Gerhard Heinrich Dieke*. Wiley Interscience, A Division of John Wiley & Sons, Inc, 1972. 325 p.
8. Karlov N.V. *Lekcii po kvantovoj elektronike* [Lectures on quantum electronics]. Moscow, Nauka Publ., 1988. 366 p. (In Russ.).

Contacts: Silkis Emmanuil Gershovitch,
esilkis@mail.ru

Article received by the editorial office on 24.10.2019