

Введение в принцип работы спектрометров HyperFine от LightMachinery

Спектрометр – это оптический прибор, предназначенный для разделения света на отдельные цвета или длины волн. Таким образом, белый свет, направленный в спектрометр, будет разделен на красный, зеленый, желтый и синий свет на выходе из спектрометра.

Внутри спектрометра можно использовать различные оптические компоненты для разделения длин волн. Выбор компонента в первую очередь зависит от требуемой разрешающей способности R [1]. Стеклопругая призма иногда используется для приборов с низким разрешением ($R < 1000$), но наиболее распространенным оптическим компонентом, используемым в современных спектрометрах, является дифракционная решетка [2]. Дифракционные решетки используются либо для пропускания, либо для отражения и обычно обеспечивают разрешающую способность в диапазоне от 1000 до 100000. Однако для получения более высокого спектрального разрешения требуется использование решеток большего размера.

Для освещения больших дифракционных решеток требуется оптика большого диаметра и большого фокусного расстояния (большие диафрагменные числа) [3], чтобы минимизировать aberrации. Большое входное фокусное расстояние (вместе с узкой щелью) также требуется для достижения высокого разрешения из-за соображений визуализации. Следовательно, приборы с дифракционными решетками с $R > 50\,000$ обычно дорогие и имеют большие размеры (длина > 1 м). Для спектрометров высокого разрешения эталоны Фабри-Перо представляют собой компактный и экономичный метод разделения близкорасположенных длин волн. На рисунке 1 поясняется принцип работы такого интерферометра [4].

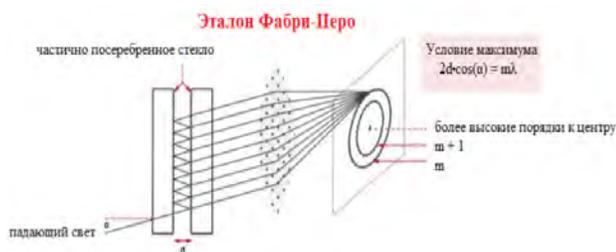


Рис. 1. Принцип работы интерферометра Фабри-Перо [5].

Обратите внимание, что условие для передачи конкретной длины волны λ заключается в том, что круговой обход между эталонными пластинами должен быть точно целым числом (m) длин волн. Если расстояние между пластинами d составляет 0.25 мм, то круговой обход равен 1000λ на 500 нм, и легко показать [4], что можно достичь $R \approx 50000$ с помощью высококачественного эталона с расстоянием между пластинами в 0.25 мм с использованием достаточно отражающих покрытий.

И хотя эталоны Фабри-Перо обеспечивают высокое разрешение, у них есть два существенных недостатка. Во-первых, через эталон проходит лишь небольшая часть длины волны падающего излучения; большая часть падающего света отражается и теряется в измерительной системе. Обычно $>95\%$ света, падающего на эталон, теряется. Вторым недостатком эталона Фабри-Перо – проблема перекрытия порядков. В приведенном выше примере свет с длиной волны 500 нм проходит через эталон 0.25 мм, потому что ровно 1000 длин волн подходят для прохода в эталоне туда и обратно. Однако свет с длиной волны 500.5 нм также будет проходить через эталон, на этот раз точно с 999 длинами волн за один проход. Система измерения не может различать эти две длины волн, которые называются порядками перекрытия (в данном случае порядки № 999 и № 1000).

Особый тип эталона, называемый VIPA (фазированная решетка с виртуальным отображением), может использоваться в сочетании с решеткой для преодоления двух недостатков эталона Фабри-Перо, сохраняя при этом его высокое разрешение. Спектрометры серии HyperFine основаны на запатентованной технологии VIPA [6] компании LightMachinery. На рисунке 2 показан принцип работы VIPA.

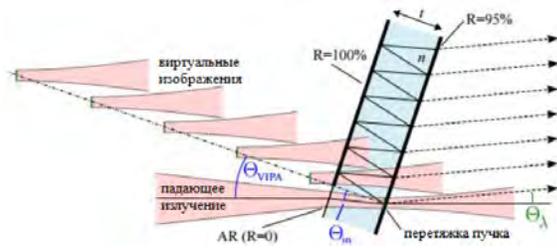


Рис. 2. Принцип работы эталона VIPA, который состоит из двух параллельных отражающих поверхностей (одна отражает $\approx 100\%$, другая $\approx 95\%$). Цилиндрическая линза используется для фокусировки света в VIPA через прорезь с просветляющим покрытием в 100% -но отражающем покрытии [7].

Как только свет сфокусирован в наклонном VIPA, он может выходить только в прямом направлении – через поверхность с отражением 95% (поверхность с отражением 100% не позволяет свету выходить назад). Следовательно, VIPA позволяет отображать весь падающий свет, попадающий в эталон и далее в измерительную систему – это значительное преимущество по сравнению с обычным эталоном Фабри-Перо, который обычно отражает и расходует более 95% падающего света. В остальном VIPA и эталоны Фабри-Перо ведут себя аналогично, как показано на рисунке 3.

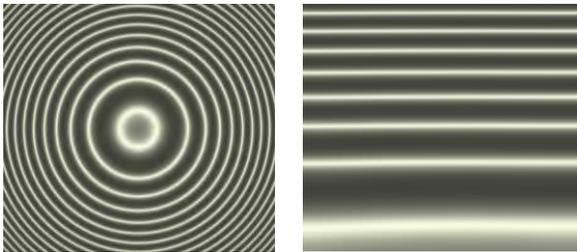


Рис. 3. Типичные световые диаграммы для эталонов Фабри-Перо и VIPA, освещенных светом одной длины волн. Слева – картина света, пропускаемого эталоном Фабри-Перо, освещенного конусом света от сферической линзы. Справа показан световой рисунок, передаваемый VIPA, освещенный тем же источником и сфокусированный цилиндрической линзой.

Во многих отношениях световой рисунок, передаваемый VIPA, эквивалентен тонкому «срезу» светового рисунка, передаваемому эталоном Фабри-Перо. Следовательно, спектрометр на основе VIPA по-прежнему сталкивается с проблемой перекрытия порядков, как показано на рисунке 4.

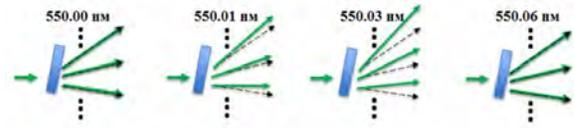


Рис. 4. Три соседних порядка, передаваемых VIPA, когда длина волны падающего света подстраивается с шагом от 550.00 нм до 550.06 нм. Обратите внимание, что VIPA не может различить свет на 550.00 нм и 550.06 нм. Разделение этих двух длин волн в 0.06 нм (или 60 пм) называется свободным спектральным диапазоном (или областью дисперсии) VIPA и соответствует стеклянному VIPA толщиной 1.68 мм [6].

К счастью, для VIPA, освещаемого с помощью цилиндрической линзы, как показано на рисунке 2, различные порядки и длины волн расходятся [8] только в вертикальном направлении (в отличие от эталона Фабри-Перо, как показано на рис. 3). Следовательно, добавление перекрестно диспергирующего элемента, который обеспечивает дисперсию в горизонтальном направлении, может разделить перекрывающиеся порядки. Разрешение в горизонтальном направлении должно быть достаточным только для разделения соседних порядков. В спектрометре HyperFine перекрестная дисперсия обеспечивается отражающей дифракционной решеткой, как показано на рисунке 5.



Рис. 5. Схема расположения оптических компонентов спектрометра HyperFine [9]. VIPA рассеивает падающий свет в вертикальном направлении, обеспечивая высокое разрешение, но также и перекрывающиеся порядки. Дифракционная решетка разделяет перекрывающиеся порядки по горизонтали.

Благодаря VIPA и решетке, обеспечивающим дисперсию в вертикальном и горизонтальном направлениях соответственно, можно использовать объектив для фокусировки всех различных длин волн на поверхности КМОП-камеры. Объектив преобразует углы (в вертикальном и горизонтальном направлениях) в положение на КМОП матрице в фокусе объектива. На рисунке 6 показан поперечный дисперсный спектр, видимый камерой.

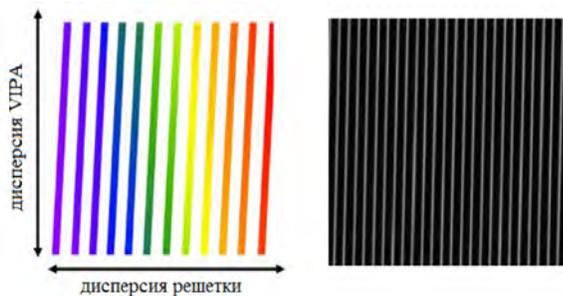


Рис. 6. Схема дисплея, ожидаемого на КМОП-камере, когда скрещенные VIPA и решетка освещены широкополосным («белым») светом. В вертикальном направлении VIPA обеспечивает высокое разрешение, но только для диапазона в одну область дисперсии. В горизонтальном направлении решетка разделяет перекрывающиеся порядки, чтобы можно было «развернуть» весь спектр высокого разрешения.

Таким образом, вертикальные полосы разделены одной областью дисперсии в горизонтальном направлении. На диаграмме красный цвет означает более длинные волны; синий более короткие длины волн. Справа показан типичный снимок экрана с камеры. Показана только небольшая часть полного КМОП сенсора, охватывающая 23 области дисперсии VIPA по горизонтали и 0.5 области дисперсии по вертикали.

Спектрометры серии HyperFine от LightMachinery сочетают в себе высокое разрешение (обеспечиваемое VIPA) с расширенным диапазоном измерения (обеспечиваемым решеткой) [10] и использует современные матрицы Мп камер вместе с индивидуальным программным обеспечением для обеспечения беспрецедентной производительности спектрометра скромных размеров и стоимости.

Запись и калибровка спектров с помощью спектрометра HyperFine

Каждый спектрометр HyperFine поставляется с индивидуальным программным обеспечением, которое позволяет пользователю полностью контролировать отображение, запись и калибровку спектров. На самом элементарном уровне пользователь имеет доступ к необработанному выходному сигналу КМОП сенсора и может написать собственное программное обеспечение для анализа определенных спектральных записей. На рисунке 7 показаны примеры необработанного сигнала с детектора как для широкополосного света, так и для монохроматического источника света.

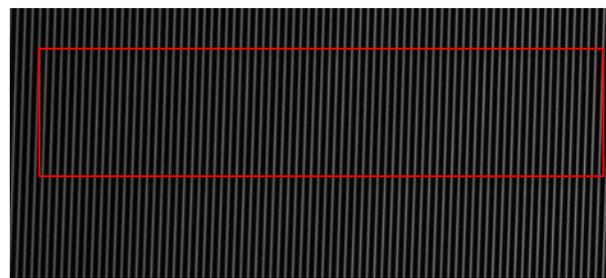


Рис. 7. Типичный вид сигнала с КМОП-сенсора, когда спектрометр HyperFine освещен широкополосным светом (вверху) и монохроматическим лазером с узкой шириной линии (внизу). Полный спектр можно извлечь, «развернув» информацию в областях, отмеченных рамкой.

Рисунок 7 (верхний) – это то же изображение, что и рисунок 6, только в небольшом увеличении. В горизонтальном направлении «полосы» света разделены одной областью дисперсии VIPA. На рисунке 7 (внизу) показаны 3 отдельных интенсивных световых пятна в вертикальном направлении. Каждое пятно представляет собой отдельный порядок VIPA, но каждое пятно формируется светом с точно такой же длиной волны (длина волны монохроматического лазера) [11]. Таким образом, обычно существует избыточная спектральная информация в вертикальном направлении, поскольку спектральные характеристики повторяются в каждом спектральном порядке. Полные спектры могут быть извлечены путем «разворачивания» информации, содержащейся в области сенсора, обозначенной рамками на рисунке 7. Программное обеспечение для HyperFine берет информацию из изображений, аналогичных рисунку 7, и калибрует весь КМОП-детектор как по горизонтали, так и по вертикали в единицах области дисперсии VIPA. Затем программное обеспечение определяет диапазон «полезных» пикселей и процедуру, которая будет использоваться в процессе «разворачивания».

В принципе, если известны как длина волны лазера, используемого для записи рисунка 7 (нижний), так и точная область дисперсии VIPA, «развернутый» спектр можно откалибровать по абсолютной длине волны. Однако, как правило, лучше более точно

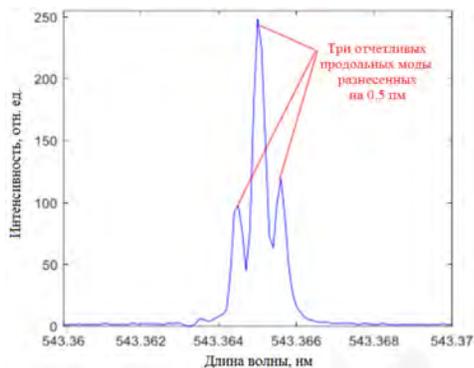
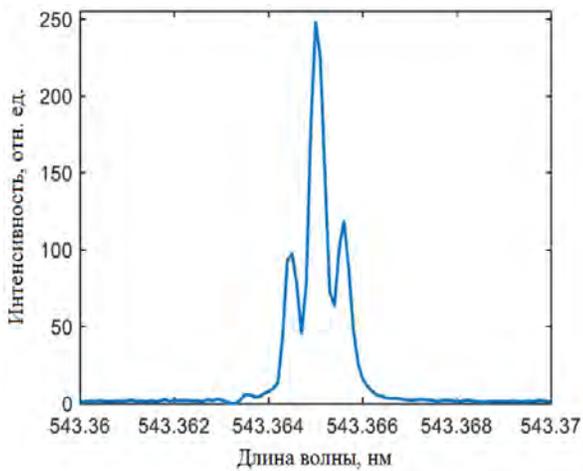


Рис. 10. Изображение КМОП-сенсора, записанное, когда свет от зеленого гелий-неонового лазера поступал на спектрометр HyperFine (вверху). Четыре различных порядка VIPA регистрируются в вертикальном направлении (VIPA имеет толщину 5 мм с областью дисперсии 20 пм). Каждый порядок показывает отличную структуру мод гелий-неонового лазера. Извлеченный спектр, отображаемый (внизу), показывает, что спектрометр может разрешать продольные лазерные моды, которые разнесены всего на 0.5 пм (500 МГц или 0.17 см^{-1}).

Стоит отметить, что спектральное разрешение, показанное на рис. 10, эквивалентно разрешающей способности $\approx 0.5 \text{ пм}$ на длине волны 500 нм (или $R = 1\,000\,000$). Другие типовые спектрометры с такой высокой разрешающей способностью, как правило, очень большие ($> 2 \text{ м}$) и очень дорогие.

Дополнительная информация

Эта статья предназначена для ознакомления с принципами работы (и программной реализацией) новой линейки спектрометров высокого разрешения от LightMachinery. Более подробную информацию о работе спектрометров можно найти в руководствах, прилагаемых к приборам, а дополнительные примеры измеренных спектров можно найти в сопутствующих документах [15].

Ссылки

1. Если две длины волны λ и $\lambda + \Delta\lambda$ могут быть разделены (или разрешены) спектрометром, то разрешающая способность спектрометра R определяется следующим образом: $R = \lambda / \Delta\lambda$. Следовательно, спектрометр, работающий на 500 нм с $R = 10000$, может разрешить две длины волны, разнесенные на 0.05 нм или 50 пм.

2. По ссылке ниже представлено описание дифракционных решеток:

<https://lightmachinery.com/optical-designcenter/library/users-guides/grating-designer-usersguide/>

Калькулятор дифракционных решеток можно найти по адресу:

<https://lightmachinery.com/optical-designcenter/more-optical-design-tools/gratingspectrometer-designer/>

3. Диафрагменное число f оптической системы, такой как линза – это отношение фокусного расстояния системы к диаметру входного зрачка. Это безразмерное число, которое является количественной мерой светосилы и важным понятием в конструкции спектрометра.

4. Ссылка ниже дает введение в эталоны Фабри-Перо:

https://en.wikipedia.org/wiki/Fabry-Pérot_interferometer

Калькулятор для эталонов Фабри-Перо можно найти по ссылке ниже:

<https://lightmachinery.com/optical-designcenter/etalon-designer/>

5. Перепечатано с:

<http://hyperphysics.phyastr.gsu.edu/hbase/phyopt/fabry.html>

6. Подробное описание VIPA можно найти по ссылке ниже

<https://lightmachinery.com/optical-designcenter/library/users-guides/vipa-designer-usersguide/>

Калькулятор VIPA можно найти по следующей ссылке <https://lightmachinery.com/optical-design-center/more-optical-design-tools/vipa-designer/>

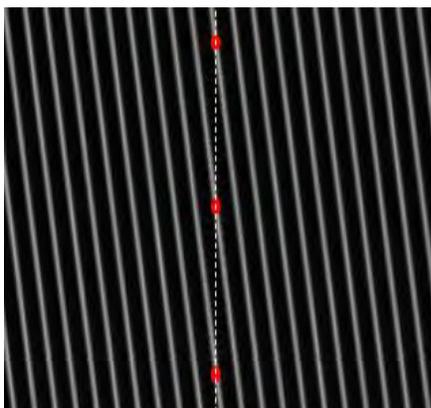
7. Перепечатано с: Metz, Philipp, et al. Optics express 21.3 (2013): 3324-3335

8. Призмы, решетки и эталоны разделяют падающий свет на составляющие, обеспечивая выход волн разной длины под разными углами – это изменение угла с длиной волны называется дисперсией.

9. Перепечатано с: Van den Berg, Steven A., et al. Scientific reports 5 (2015): 14661.

10. Особенности скрещенной дисперсии HyperFine спектрометра аналогичны используемым в спектрометрах на основе эшелле-решеток. Однако инструменты с эшелле-решеткой с разрешающей способностью, сопоставимой с HyperFine спектрометром, обычно намного больше и дороже.

11. Каждый порядок VIPA центрируется на отдельной «полосе», как схематически показано ниже



12. Введение в линии Фраунгофера можно найти на: https://en.wikipedia.org/wiki/Fraunhofer_lines
Более подробное описание солнечного спектра дается в презентации НАСА: http://mark4sun.jpl.nasa.gov/report/UT_seminar_Solar_Spectrum_Toon.pdf

13. Спектральная ширина некоторых из наиболее сильных линий Фраунгофера приведена на сайте: <http://www.costi.org/9006-025.htm>

14. Beckers, Jacques M., Charles A. Bridges, and Lou B. Gilliam. A High Resolution Spectral Atlas of the Solar Irradiance from 380 to 700 Nanometers. Volume 2. Graphical Form. No. AFGL-TR-76-0126 (II). AIR FORCE GEOPHYSICS LAB HANSCOM AFB MA, 1976.

15. Дополнительные документы, доступные от LightMachinery, описывают спектры высокого разрешения для калибровочных ртутных ламп, солнечного излучения, пикосекундных лазеров и бриллиантового рассеяния.