



ПРЕИМУЩЕСТВА СПЕКТРОСКОПИИ НА ОСНОВЕ ПРОПУСКАЮЩЕЙ ДИФРАКЦИОННОЙ РЕШЕТКИ

T. Расмуссен, Ph.D. (Интегральная оптика), Ibsen Photonics, www.ibsen.com, Датский технический университет (DTU), Копенгаген, Дания

Сочетание преимуществ и конкурентоспособной цены пропускающих дифракционных решеток привело к росту потребительского интереса к компактным спектрометрам на их основе. В статье представлены два альтернативных проекта компактных спектрометров, базирующихся на пропускающих решетках.

ВВЕДЕНИЕ

За последние 15 лет заметно увеличилась стоимость компактных недорогих спектрометров. Объем рынка таких изделий исчисляется уже сотнями миллионов долларов, а область их применения варьируется от задач анализа содержания гемоглобина в крови [1] до точного определения цвета [2] текстиля и сортировки светодиодов на крупных заводах по производству полупроводников.

Большинство таких компактных спектрометров основывается на оптической схеме – конфигурации Черни-Тернера [3] – с отражающей дифракционной решеткой в качестве диспергирующего элемента, разлагающего падающую волну на дифракционные максимумы, регистрируемые детектором в виде линейной матрицы. Успех использования этой оптической схемы основан на следующих фактах: во-первых, конфигурация обеспечивает компактную траекторию пучка без перекрытия лучей; во-вторых, отражающая решетка может быть изготовлена серийно, то есть с относительно низкими затратами.

В статье представлены два альтернативных этой схеме проекта – компактные спектрометры, базирующиеся на пропускающих, а не на отражающих решетках. Это объясняется очевидными преимуществами геометрических параметров прибора на основе пропускающих решеток:

- конструкция спектрометра [4] обеспечивает легкий доступ зондирующего излучения

THE BENEFITS OF TRANSMISSION GRATING BASED SPECTROSCOPY

T. Rasmussen, Ph.D. (of Integrated Optics), Business Development, Sales, and Marketing at Ibsen Photonics, www.ibsen.com, Technical University of Denmark (DTU), Copenhagen, Denmark

Combining the attractive benefits with a competitive price has led to a renewed customer interest in transmission grating based compact spectrometer designs. In this paper two alternative compact spectrometer designs based on transmission gratings are presented.

INTRODUCTION

During the past 15 years compact, low cost spectrometers have grown to a fairly large market size of hundreds of millions of dollars, with applications ranging from medical haemoglobin content analysis over accurate color determination of textiles to sorting of LEDs in large semiconductor manufacturing plants.

The majority of these compact spectrometers have been based on the Crossed Czerny-Turner configuration with a reflective diffraction grating as the dispersive element separating the wavelength content onto a linear detector array. The success of this configuration is based on the facts that a) the configuration provides a compact and folded beam path and b) the reflective grating can be mass-produced at relatively low cost.

In this white paper I will present two alternative compact spectrometer designs based on transmission gratings rather than reflective gratings and explain the distinct benefits of the transmission grating based geometries:

- A spectrometer design that allows easy access to the detector plane and thereby provides larger flexibility for OEM integrators.
- A higher throughput that enables higher sensitivity, shorter integration time, faster spectral scan, and/or lower light source power consumption

In all fairness, high quality transmission gratings have traditionally been expensive to manufacture and this is probably one of the key reasons that they have not really been considered for compact spectrometer

к плоскости детектора, и тем самым обеспечивает большую гибкость для OEM-интеграторов;

- более высокая пропускная способность обеспечивает высокую чувствительность, более короткое время обработки интегрального сигнала, большую скорость сканирования спектра и/или более низкое энергопотребление источником света.

Справедливости ради следует отметить, что производство высококачественных пропускающих решеток традиционно дорого, и это, вероятно, одна из ключевых причин, по которой они действительно не рассматривались для использования в конструкциях компактных спектрометров. Однако недавние достижения в технологии изготовления пропускающих решеток [5], например используемые компанией "Ibsen Photonics", привели к тому, что объемы и цены продаж таких решеток стали сравнимы с ценами отражательных решеток, изготовленных голографическим способом на плавном кварце.

Таким образом, сочетание привлекательных преимуществ и конкурентоспособной цены привело к возобновлению интереса к компактным спектрометрам на основе пропускающих решеток.

КОНФИГУРАЦИИ СПЕКТРОМЕТРОВ

В состав любого спектрометра входят три основных оптических узла:

- коллимирующая оптика на входе;
- дифракционная решетка;
- фокусирующая оптика, собирающая волны различных длин электромагнитного спектра и направляющая их на разные пиксели детекторной матрицы.

Эти компоненты входят и в кросс-корреляционный спектрометр Черни-Тернера (ЧТ, *англ.* Crossed Czerny-Turner – CCT), и спектрометр, созданный на основе пропускающей решетки [6] (СОПР, *англ.* Transmission Grating based Spectrometer – TGS). Для СОПР (TGS) мы рассмотрим две основные конструкции, которые несколько отличаются друг от друга своими характеристиками: одна построена по схеме Линза-Решетка-Линза (ЛРЛ, *англ.* Lens-Grating-Lens – LGL), в ней используются две линзы и решетка, и другая, построенная по схеме Зеркало-Решетка-Зеркало (ЗРЗ, *англ.* Mirror-Grating-Mirror – MGM), в которой используются два зеркала и решетка.

На рис.1 показаны компоновки ЧТ-, ЛРЛ- и ЗРЗ-спектрометров, а также схематические траектории луча.

designs. However, recent advances in manufacturing techniques at for instance Ibsen Photonics have led to sales prices in volume of holographically produced, fused silica gratings comparable to reflection gratings.

So, combining the attractive benefits with a competitive price has led to a renewed interest in transmission grating based compact spectrometer designs.

SPECTROMETER CONFIGURATIONS

Any spectrometer consists of three basic optical components:

- collimating optics at the input
- a diffraction grating
- focusing optics that focus different wavelengths of the spectrum onto different pixels on the detector array

Both the Crossed Czerny-Turner (CCT) and the Transmission Grating based Spectrometer (TGS) include these three elements.

For the TGS, we will consider two basic designs which have slightly different characteristics – the Lens-Grating-Lens (LGL) using two lenses and a grating, and the Mirror-Grating-Mirror (MGM) using two mirrors and a grating.

Figure 1 shows the CCT, the LGL, and the MGM spectrometer lay-outs and schematic beam paths.

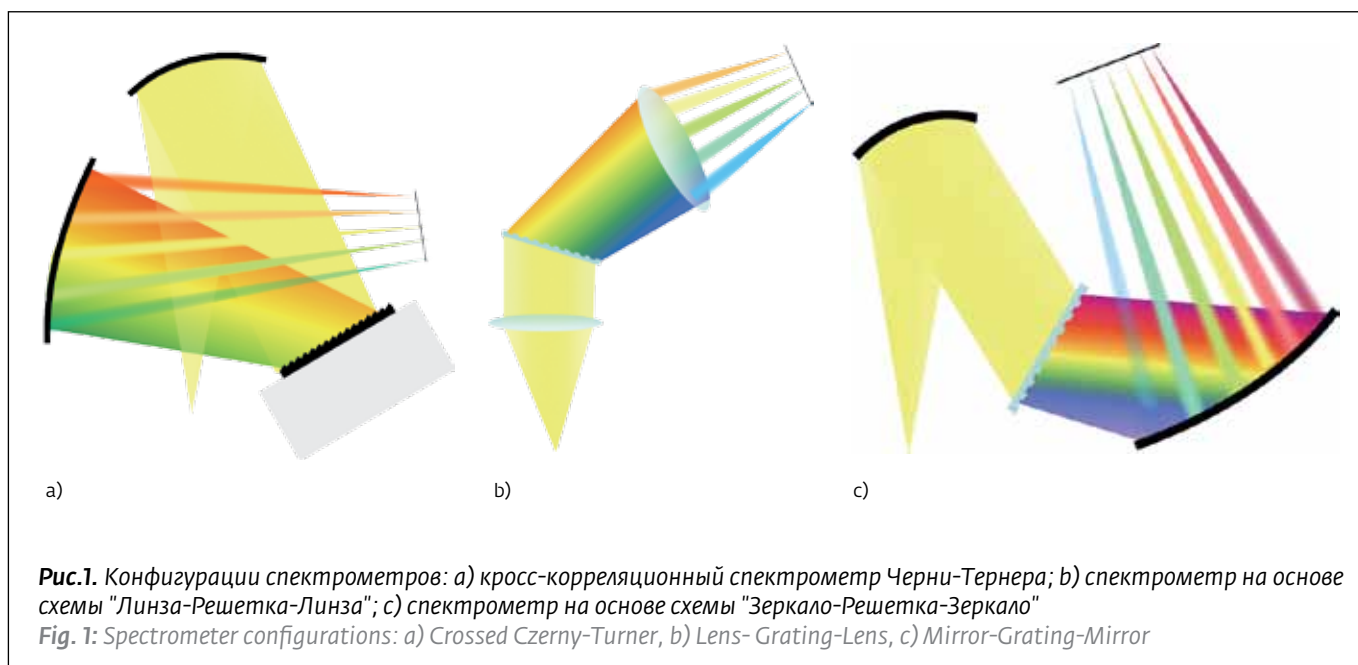
SOME WORDS ON SPECTROMETER COMPARISON

Before we dive into a comparison of reflection grating based with transmission grating based spectrometers, I would like to mention some important design consideration. The key parameters to consider when specifying (the optical part of) a spectrometer are:

- the wavelength range
- the resolution
- the signal-to-noise ratio and stray light level requirements
- the dynamic range requirements
- the linearity requirements
- the power coupling into the spectrometer (Etendue)
- the physical size of the spectrometer

A spectrometer can in general not be optimised for all parameters, so it is important to compare only spectrometers that are designed for the same application.

As an example let us consider why good resolution and high power coupling (Etendue) are opposite design criteria. The Etendue is a measure of how much light can be coupled into a spectrometer and is



КРАТКОЕ СРАВНЕНИЕ СПЕКТРОМЕТРОВ

Прежде чем перейти к сравнению спектрофотометров, построенных на основе отражательных и пропускающих решеток, следует упомянуть о некоторых важных конструкторских соображениях при проектировании. Основными параметрами, которые необходимо учитывать при расчете (оптической части) спектрометра, являются:

- диапазон длин волн;
- разрешение;
- отношение сигнал/шум и уровень рассеянного света;
- требования к динамическому диапазону;
- требования к линейности;
- силовая связь в спектрометре (оптический фактор);
- физический размер спектрометра.

Спектрометр целиком не может быть оптимизирован по всем параметрам, поэтому важно сравнивать только те спектрометры, которые разработаны для одной цели использования.

В качестве примера рассмотрим, почему при проектировании спектрометра пути достижения максимального значения двух параметров – высокого спектрального разрешения и высокой оптической силы (оптического фактора) – противоречат друг другу. Оптическая сила – параметр, определяющий сходимости светового пучка. Он является мерой того, сколько света может быть использовано в спектрометре, и определяется площадью входной щели, умноженной на квадрат числовой апертуры входной линзы.

given by the area of the input slit times the numerical aperture squared.

The resolution is defined as the Full Width at Half Maximum (FWHM) of the peak that the spectrometer measures when the input is a monochromatic light source. The minimum obtainable resolution of a spectrometer is equivalent to the spot size on the detector of a monochromatic point source at the entrance of the spectrometer. This minimum spot size is theoretically determined by the diffraction limited spot size that can be obtained on the detector. However, in most compact spectrometers the minimum spot size is determined by aberrations in the optics inside the spectrometer (the lenses/mirrors and grating). So, in order to obtain a very good resolution the spectrometer should be designed with a near on-axis beam path to reduce aberrations as much as possible. This means that the opening angle of the spectrometer (the numerical aperture) will be very small and the input beam will have to pass through a small slit. Both the low numerical aperture and the small slit means that only a fraction of the input light to the spectrometer will be used as depicted in Figure 2.

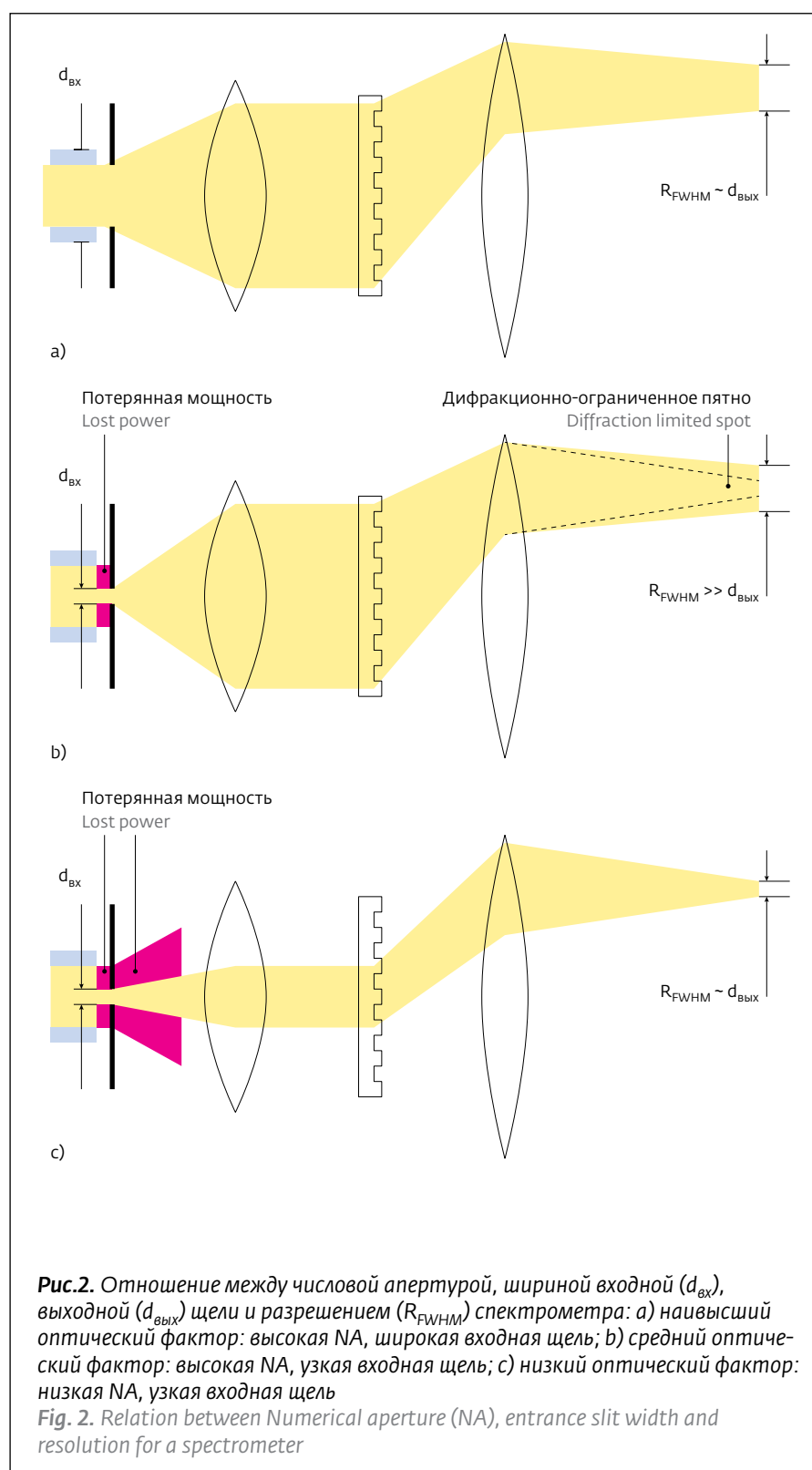
In the following we compare spectrometers with the same Etendue (numerical aperture=0.11 and infinitesimal small slit width) to make sure we compare apples with apples.

COMPARISON OF SPECTROMETER CONFIGURATIONS

Table 1 provides a rough comparison of the overall characteristics in terms of resolution, throughput,

Разрешение спектрометра определяется полной шириной спектрального пика монохроматического света, измеренной на высоте одной второй от максимума его интенсивности (ПШПМ, *англ.* Full Width Half Maximum – FWHM) [7]. Минимально достижимая разрешающая способность спектрометра эквивалентна размеру пятна на детекторе от монохроматического точечного источника, расположенного на входе спектрометра. Такой минимальный размер пятна теоретически определяется размером пятна, ограниченного дифракционным пределом. Однако в большинстве компактных спектрометров минимальный размер пятна определяется aberrациями внутренних оптических элементов спектрометра (Линзы/Зеркала и Решетка). Поэтому, чтобы получить очень хорошее разрешение и максимально снизить aberrации, спектрометр должен быть спроектирован таким образом, чтобы траектория луча проходила в параксиальной области, то есть была расположена ближе к оси. Но это означает, что апертурный угол спектрометра (а вслед за ним и числовая апертура) будет очень мал и будет мала входная щель, через которую должен пройти падающий пучок. И низкая числовая апертура, и небольшая щель означают, что в спектрометре будет использована только часть входного света, то есть прибор будет обладать низкой оптической силой (рис.2).

Теперь сравним спектрометры с одинаковой оптической силой (оптическим фактором), чтобы обеспечить сравнение аналогичных конфигураций. Пусть у них бесконечно малая ширина щели и числовая апертура $NA = 0,11$.



and detector flexibility for the three spectrometer platforms. The table has been compiled using data from realized Ibsen spectrometers like the ROCK VIS series as well as spectrometer data from for instance



СРАВНЕНИЕ КОНФИГУРАЦИЙ СПЕКТРОМЕТРОВ

В таблице дано приблизительное сравнение общих характеристик спектрометров трех базовых оптических схем с точки зрения разрешения, пропускной способности и гибкости детектора. Таблица была составлена с использованием данных спектрометров производства "Ibsen", например спектрометров серии ROCK VIS, а также данных таких спектрометров, как например, Ocean Optics USB4000 и Avantes Avaspec 2048. Как мы видим, все три платформы обеспечивают одинаковое разрешение относительно охватываемого диапазона длин волн. Это является следствием того, что размеры пучков относительно оптических компонентов примерно одинаковы во всех компактных спектрометрах, и поэтому aberrации (определяющие минимальное разрешение) также примерно одинаковы.

В таблице четко показано, что платформы ЛРЛ и ЗРЗ приводят к наивысшей пропускной способности, что подробнее будет описано в следующем разделе.

Выбор между платформами ЛРЛ и ЗРЗ в основном зависит от следующих соображений. Если при измерении стоит задача собрать как можно больше мощности от образца (играет роль высокий оптический фактор), не достигая высокого разрешения, то следует рассмотреть возможность использования спектрометра с высокой ЧА. Для этого лучше всего подходит конфигурация ЛРЛ, так как диаметр пучка и оптических элементов можно легко расширить без риска получить перекрытие лучей. С другой стороны, если требуется достичь сверхвысокого разрешения, а сбор мощности менее важен исследователю, то лучшим вариантом может оказаться конфигурация ЗРЗ, потому что зеркала дешевле, чем объективы. Наконец, в УФ-диапазоне платформа ЗРЗ может стать более предпочтительной, чем ЛРЛ, так как стекло УФ-класса стоит много дороже, чем зеркала для того же диапазона.

Оптическая пропускная способность

Основным преимуществом спектрометров на основе пропускающих решеток является

Ocean Optics USB4000 and Avantes Avaspec2048. As can be seen, all three platforms provide the same resolution relative to the wavelength range to be covered. This is a consequence of the fact that the sizes of the beams relative to the optical components are roughly the same in all compact spectrometers and therefore the aberrations (determining the minimum resolution) are also roughly the same.

Table 1 clearly shows that the LGL and MGM platforms result in the highest throughput as will be further explained in the next section.

The choice between the LGL and MGM platforms depends mostly on the following considerations. If high power collection from the sample (high Etendue) is more important than a small resolution, one should consider a high NA spectrometer. This is best obtained with the LGL design since the optics and beam sizes can easily be expanded without the risk that beams overlap. On the other hand, if an ultra-small resolution is required and power collection is less important the MGM might prove to be the best option because mirrors tend to be less costly than lenses. Finally, in the UV range the MGM platform may be preferred over the LGL since UV-grade glass can be more expensive than mirrors.

Optical throughput

The key benefit of transmission grating based spectrometers is a higher throughput due to the fact that transmission gratings generally provide higher diffraction efficiency than reflective gratings. Figure 3 shows a comparison of typically used commercial diffraction gratings for the visible range (400-800

Сравнение спектрометра Черни-Тернера с конфигурациями двух спектрометров на основе пропускающих решеток

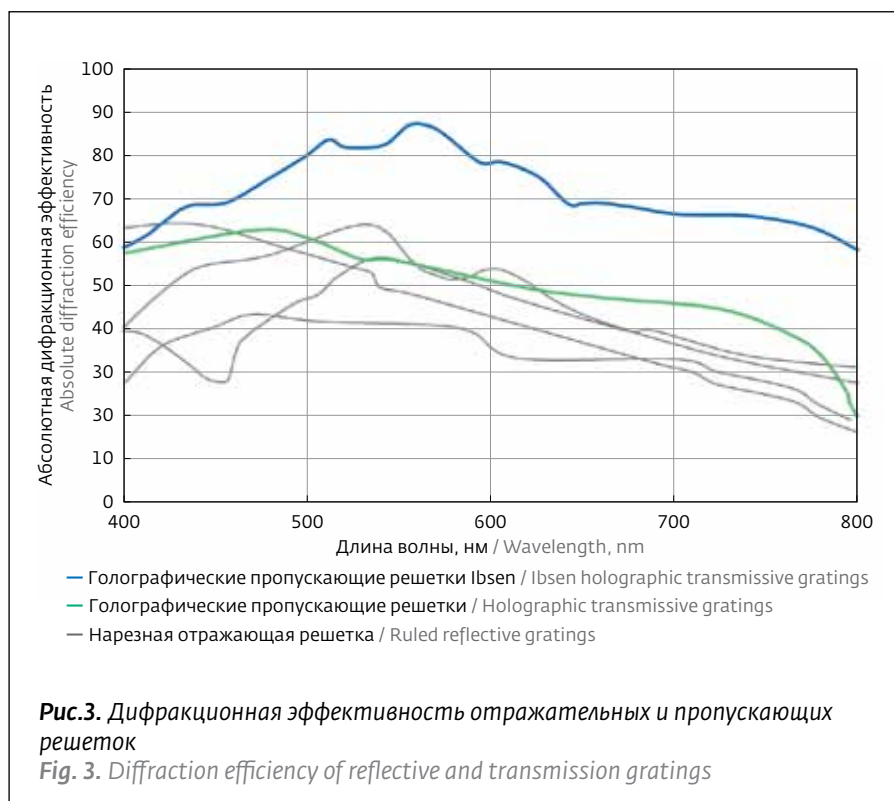
Comparison of Czerny-Turner with the two transmission grating based spectrometer configurations

Платформа Platform	Тип решетки Grating type	Минимальное разрешение Minimum resolution (NA = 0,11)	Пропускная способность Throughput	Легкий доступ к детектору Easy detector access
ЧТ CCT	Отражающая Reflective	~Диапазон/700 ~Range/700	~40-60%	Нет No
ЛРЛ LGL	Пропускающая Transmission	~Диапазон/700 ~Range/700	~60-90%	Да Yes
ЗРЗ MGM	Пропускающая Transmission	~Диапазон/700 ~Range/700	~ 60-90%	Нет No

более высокая пропускная способность [8] из-за того, что пропускающие решетки обычно обеспечивают более высокую дифракционную эффективность, чем отражательные решетки. На рис.3 дано сравнение традиционно используемых коммерческих дифракционных решеток для видимого диапазона (400–800 нм). Как видно, голографическая пропускающая решетка из плавленного кварца обеспечивает на 50–100% больше абсолютную пропускную способность в данном диапазоне длин волн, чем отражающие решетки. Это различие – проявление нескольких факторов.

Отражающие решетки имеют металлическое покрытие с отражательной способностью до 90%. В отличие от них, пропускающие решетки обычно вытравливаются непосредственно в кварцевой подложке и имеют противоотражающее покрытие на противоположной решетке поверхности. Таким образом, из-за отсутствия металлического покрытия внутреннее пропускание составляет почти 100%, а противоотражающее покрытие может обеспечить передачу на детектор более 98% интенсивности падающего пучка.

Кроме того, пропускающие решетки содержат возможность задавать больше конструктивных параметров, чем отражающие решетки. Форма кривизны пропускающей решетки может быть оптимизирована как на этапе ее изготовления, так и при травлении по глубине травления (рис.4а). Поэтому пропускающая решетка может быть оптимизирована с большей эффективностью в широком диапазоне длин волн. Для сравнения отражающие светящиеся решетки имеют только один конструктивный параметр – угол блеска (рис.4б). Профиль линии решетки определяется углом блеска и плотностью линий, и поэтому любая оптимизированная по углу блеска дифракционная решетка будет иметь почти такую же дифракционную эффективность, как показано на рис.4б). Естественно, что максимальная эффективность достигается на длине волны блеска (длина волны, на которой решетка была оптимизирована), но эффективность падает довольно быстро, особенно на коротковолновой хвостовой части импульса.



nm). As can be seen, the Holographic, fused silica transmission grating provide 50–100% more absolute throughput over the wavelength range than reflective gratings. This difference is a consequence of several factors.

The reflective gratings are coated with a metal coating which can have a reflectance as low as 90%. In contrast transmission gratings are typically etched directly into a pure fused silica substrate and provided with an AR coating on the surface opposite to the grating. Thus, the inherent transmission is very close to 100% since there are no metal coatings and the AR coating can provide more than 98% transmission.

Furthermore, transmission gratings contain more design parameters than reflective gratings. The line shape of a transmission grating can be optimized in both the duty cycle and the etching depth as shown on Figure 4 a). Therefore, a transmission grating can be optimized to high efficiency over a broad wavelength range. In comparison, reflective blazed gratings have only one design parameter – the blaze angle and indicated on Figure 4 b). The grating line profile is determined by the blaze angle and line density and therefore any blazed grating will have almost the same diffraction efficiency as indicated on Figure 4 b). Maximum efficiency is naturally obtained at the blaze wavelength (the wavelength

Гибкость размеров детектора

Из схематических чертежей трех спектрометрических платформ на рис.1 совершенно четко видно, что развернутая платформа ЛРЛ обеспечивает лучшую гибкость при замене детектора, поскольку детектор отделен от остальной части оптических компонентов и траекторий луча. Это также относится к другим компонентам, таким как оптические фильтры и апертуры, которые намного легче вписываются в платформу ЛРЛ, чем ЧТ и ЗРЗ.

Температурная стабильность

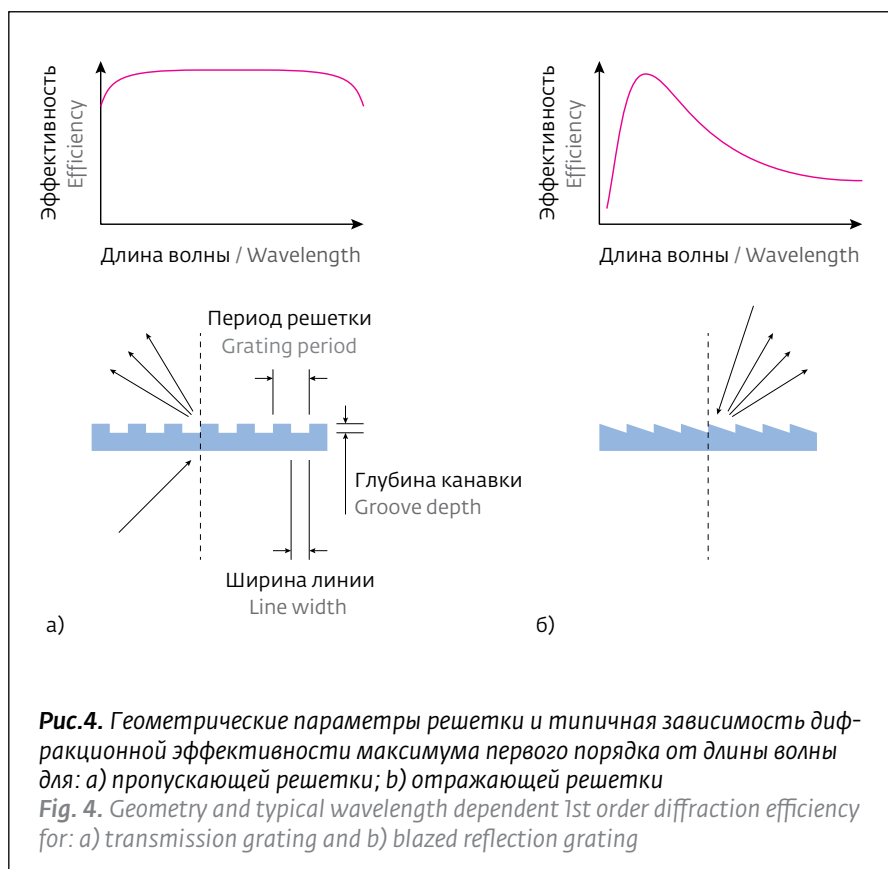
Платформа СОПР использует пропускающую решетку, выполненную из чистого плавленого диоксида кремния и пригодную для использования в очень широком температурном диапазоне. Кроме того, плавленый диоксид кремния имеет очень низкий коэффициент теплового расширения, и поэтому спектрометр на основе такой решетки обладает чрезвычайно высокой термической стабильностью.

ПРИМЕРЫ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ

В данном разделе описываются некоторые примеры использования спектрометра с пропускающей решеткой, когда его важные преимущества могут исполнять важную роль. Эти примеры не исчерпывают все существующие возможности конкретного применения.

Увеличение времени автономной работы портативных спектрометров

Аккумуляторные спектрометры с батарейным питанием становятся весьма популярными в различных конфигурациях, таких как быстрая проверка цвета текстиля или идентификация химических веществ в фармацевтике и индустрии безопасности, с использованием спектроскопии комбинационного рассеяния. Естественно, срок службы батареи – один из ключевых параметров для таких устройств, который определяет потребление энергии. Внедряя систему ЛРЛ с числовой апертурой $NA=0,22$ и используя пропускающую



the grating was optimized for) but the efficiency falls off quite rapidly especially on the short wavelength tail.

Detector size flexibility

From the schematic drawings of the three spectrometer platforms in Figure 1, it is quite obvious that the unfolded LGL platform provides the best flexibility for changing detector since the detector is well separated from the rest of the optical components and beam paths. This actually also goes for other components such as optical filters and apertures that are much easier to fit into the LGL platform than the CCT and MGM.

Temperature stability

The TGS platform uses a transmission grating made from pure fused Silica and is as such useable in a very wide temperature range. Furthermore, fused Silica has a very low thermal expansion coefficient, and therefore the thermal stability of a spectrometer based on such a grating is extremely good.

APPLICATION EXAMPLES

In this section I will highlight some application examples where a transmission grating based



решетку из плавленного кварца, легко получить пропускную способность, в четыре раза большую, чем при использовании традиционных рыночных ЧТ-спектрометров*. Такая большая чувствительность может использоваться для снижения питания источников света в системе энергопотребления.

Повышение производительности для поточной спектроскопии процесса

Во многих отраслях промышленности спектрометры используют для контроля качества/процесса в производстве. Одним из примеров является светодиодная промышленность, где светодиоды тестируются на спектральные характеристики излучения на уровне пластины. Очевидно, существует необходимость, чтобы такие процессы контроля проводили как можно с меньшим временем. Для спектрометра это означает режим работы с коротким временем интегрирования сигнала от массива детекторов. Массивы детекторов обеспечивают время интегрирования до 1 мкс, но в большинстве случаев детектор за такой корот-

спектрометр can provide important benefits. These examples are just meant as appetizers and I am sure you will be able to find many more examples within your own specific application area of interest.

Increasing battery life time for portable spectrometers

Handheld, battery operated spectrometers are becoming quite popular for various applications like fast color checks of textiles or identification of chemicals in the pharma and security industry using Raman spectroscopy. Naturally, one of the key parameters for such devices is the battery life that is determined by the power consumption. By implementing an LGL system with an NA of 0.22 and a fused Silica transmission grating it is easily possible to obtain 4 times higher throughput than traditional CCT spectrometers on the market¹. This better sensitivity can be used to lower the power consumption of the light sources in the system.

Increasing productivity for in-line process spectroscopy

Many industries are using spectrometers for quality/process control in manufacturing. One

* *Примечание автора:* получено в результате прямого сравнения ROCK VIS RSV-300 и Ocean Optics USB2000

кий период времени не соберет ничего, кроме шума, то есть собранного света не будет достаточно для измерения сигнала. Однако при использовании высоконадежного спектрометра с высокой пропускной способностью время интегрирования может быть сокращено в 10-20 раз по сравнению с традиционными спектрометрами.

ВЫВОДЫ

Рассмотрены два оригинальных компактных спектрометрических проекта на основе пропускающих дифракционных решеток, а также описаны различные преимущества, которые такие спектрометры имеют по сравнению с традиционными спектрометрами на основе отражательной решетки.

Как правило, спектрометры на основе пропускающих решеток (СОПР) следует рассматривать в приложениях и приборах для спектроскопии, где удовлетворения требует только одно или несколько из нижеперечисленных условий:

- низкий уровень освещенности;
- короткое время интегрирования/быстрое спектральное сканирование;
- доступ к детектору для интеграции с OEM;
- высокая термическая стабильность.

Благодаря последним разработкам в области производства решетки, цены на компактные спектрометры, базирующиеся как на пропускающей решетке, так и на отражательной решетке, находятся в одном диапазоне. Таким образом, выбор платформы спектрометра действительно может быть сделан на основе требований конкретного технического запроса (рис.5). Спектрометры компании Ibsen Photonics отвечают запросам огромного корпуса экспертов, промышленных специалистов, метрологов и исследователей. Компания "ОЭС Спецпоставка" совместно с НЦВО "Фотоника" представляет весь спектр продуктов Ibsen Photonics на территории Российской Федерации и предлагает наиболее выгодные условия сотрудничества, полную техническую поддержку, а также поставку образцов. Получить дополнительную информацию можно на сайте производителя – компании Ibsen Photonics (www.ibsen.com) – или обратившись в компанию ОЭС Спецпоставка (www.oessp.ru). Оптимальный выбор новой спектроскопической платформы вполне может касаться спектрометров на основе пропускающей решетки.

Статья подготовлена при поддержке компании ООО «ОЭС Спецпоставка», которая является официальным представителем продукции Ibsen Photonics на территории Российской Федерации.



Рис.5. Рынок спектрометров
Fig. 5. Market of spectrometers

example is the LED industry where LEDs are tested on wafer level for their spectral emission properties. Obviously, there is a desire for such processes to run as quickly as possible. For the spectrometer this means running with as short integration times for the detector array as possible. Detector arrays allowing integration times as short as 1 microsecond do exist, but in most cases the detector will not collect enough light in such a short time period to measure anything but noise. However, with a high NA spectrometer using a high throughput transmission grating the integration time can easily be shortened by a factor of 10-20 times over traditional spectrometers.

SUMMARY

In this white paper I have reviewed two generic, compact spectrometer designs based on transmission diffraction gratings, and described the distinct benefits that such spectrometers have over traditional reflection grating based spectrometers.

In general, transmission grating based spectrometers (TGS) should be considered for



ЛИТЕРАТУРА

1. **Liu, H. et al.** Influence of blood vessels on the measurement of hemoglobin oxygenation as determined by time-resolved reflectance spectroscopy. – Medical physics, 1995, v.22, № 8, p.1209–1217.
2. **Branchini, Bruce R. et al.** An alternative mechanism of bioluminescence color determination in firefly luciferase. – Biochemistry, 2004, v.43, № 23, p.7255–7262.
3. **Austin, Dane R., Tobias Witting, and Ian A.** Walmsley. Broadband astigmatism-free Czerny-Turner imaging spectrometer using spherical mirrors. – Applied optics, 2009, v.48, № 19, p.3846–3853.
4. **Neumann W.** Fundamentals of Dispersive Optical Spectroscopy Systems. – SPIE, PM242, 2014.
5. **Hansen, Th. Rasmussen, M. Rasmussen, Poul Jespersen, O. Jespersen, N. Rasmussen, B. Rose.** How to Design a Miniature Raman Spectrometer. – 2015.
6. **Redding, Brandon et al.** Compact spectrometer based on a disordered photonic chip. – Nature Photonics, 2013, v.7, № 9, p.746.
7. **K. Baldry et al.** – Publ. Astron. Soc. Pac., 2004, v.116, p.403–414.
8. **Th. Rasmussen.** – Overview of High-Efficiency Transmission Gratings for Molecular Spectroscopy. – Spectroscopy, 2014, v.29, № 4, p.32–39.

spectroscopy applications and instruments where one or more of the following requirements are important:

- Low light levels
- Short integration time / fast spectral scans
- Access to detector for OEM integration
- High thermal stability

With recent developments in grating manufacturing, prices of transmission grating based and reflection grating based compact spectrometers are in the same range. So, the choice of spectrometer platform really has to be done based on technical requirements.

Hopefully, this paper has opened your eyes to the fact that the optimum choice for your next spectroscopy platform might very well be a transmission grating based one.

The article was prepared with the support of the company "ECO Spetspostavka", that is the official representative of Ibsen Photonics products in the Russian Federation.

КНИГИ ИЗДАТЕЛЬСТВА "ТЕХНОСФЕРА"

ОСНОВЫ МИКРОВОЛНОВОЙ
ФОТОНИКИ

Урик Винсент Дж.-мл., МакКинни Джейсон Д., Вилльямс Кейт Дж.

Перевод с английского д.т.н. М.Е.Белкина, к.ф.-м.н. И.В.Мельникова, к.ф.-м.н. В.П.Яковлева

Под редакцией д.т.н., д.э.н., проф. С.Ф.Боева, акад. РАН, д.ф.-м.н., проф. А.С.Сизова

При поддержке ОАО "РТИ"

М: ТЕХНОСФЕРА,
2016. – 376 с.,
ISBN 978-5-94836-445-2

Цена 1090 руб.

Данное издание представляет собой фундаментальное последовательное описание физических основ исследований и разработок в области компонентной базы и оборудования радиофотонных систем. Книга состоит из 10 глав. Отдельная глава посвящена еще слабо изученным вопросам разработки мощных высоколинейных фотодетекторов, в которых NRL является признанным мировым лидером. Помимо основных глав книга включает шесть приложений, облегчающих понимание использованного математического аппарата. Важной методической особенностью данной книги является согласованное изложение методов, принципов и подходов, изученных еще в прошлом столетии и введенных в последние 2–3 года.

Книга предназначена главным образом для студентов высшей школы и аспирантов, обучающихся по направлению "Фотоника", но также может быть полезна для преподавательского состава, для разработчиков аппаратуры в рамках этого только развивающегося в России направления науки и техники, а также для научных и технических специалистов в смежных областях.

КАК ЗАКАЗАТЬ НАШИ КНИГИ?

✉ 125319, Москва, а/я 91; ☎ (495) 234-0110; 📠 (495) 956-3346; ✉ knigi@technosphera.ru, sales@technosphera.ru