



## ПИРОЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ ДАТЧИКИ С НЕСКОЛЬКИМИ ФИЛЬТРАМИ (МНОГОКАНАЛЬНЫЕ) И С ПЕРЕСТРАИВАЕМОМ ФИЛЬТРОМ

*Н.Ньюман, М.Эберман, К.Шрайбер, М.Хейнц,  
InfraTec, Дрезден, Германия*

Рассмотрены два типа пирозлектрических датчиков – многоканальные (снабженные несколькими фильтрами) и датчики с перестраиваемым фильтром. Ключевыми элементами обоих типов датчиков являются делитель пучка, имеющий оригинальную форму поверхности, и оптический фильтр Фабри-Перо. В конструкции обоих типов датчиков пирозлектрические элементы находятся за фильтрами. Проведено сравнение их возможностей детектирования газовых смесей.

**Д**ля обеспечения равномерного распределения потока излучения поверхность делителя пучка выполнена оригинальным способом: на поверхности пластины методом микрообработки сформированы микропирамиды или V-образные канавки, расположенные с шагом 100–150 мкм. Узкополосные фильтры ИК-излучения помещены в кассету, имеющую форму усеченной четырехугольной пирамиды. Угол наклона граней микропирамид и сторон кассеты с фильтрами составляет 30°, что гарантирует падение отраженных лучей на поверхность фильтра под прямым углом. Перестраиваемый фильтр представляет собой микроэлектромеханическую систему (МЭМС, MEMS) с резонатором Фабри-Перо. Держатели зеркал резонатора имеют сравнительно большую толщину; один держатель неподвижен, а второй подвешен на пружинах с компенсирующими элементами. Регулирование воздушного зазора между зеркалами резонатора осуществляется электростатическим полем: управляющее напряжение подается между верхним зеркалом и электродом на нижнем держателе. Были изготовлены фильтры с коротким и длинным резонатором для спектральных диапазо-

## MULTI-COLOUR AND TUNABLE-COLOUR PYROELECTRIC DETECTORS

*N. Neumann, M. Ebermann, K. Schreiber, M. Heinze,  
InfraTec GmbH, Dresden, Germany*

Multi-colour and tunable colour pyroelectric detectors are compared in respect of gas analysis. The key elements of the detectors are a beam splitter and a Fabry-perot filter respectively. Multi-colour and tunable colour pyroelectric detectors are compared in respect of gas analysis.

Infrared gas analysers are based on the absorption of infrared radiation. These systems determine the concentration of a specific gas by measuring the amount of radiation absorbed at specific wavelengths, corresponding to electronic transitions in the molecules being detected. In figure 1, the discrete absorption bands of carbon monoxide, carbon dioxide, propane, methane, and nitrous oxide are shown in the range from 3...5  $\mu\text{m}$  as an example.

Methods using filters for analysing a broadband emitter spectrum, play a major role in industrial and medical gas analysis. Often such filter photometers are ranked among non-dispersive methods. This is not completely correct, as the filters themselves rely on the interference principle [2].

The analyser, schematically shown in fig. 2 includes a sample chamber for holding a sample gas, a radiation emitter for directing a beam through the chamber and a detector for indicating the amount of radiation absorbed. Pyroelectric detectors are widely used as a result of their advantages, like room temperature operation, robustness, flat spectral response and low costs. The narrow band infrared filters are selected in accordance to the substances to be analysed. The bandwidth of the filter is much broader than a single absorption line and could be several percent of the centre wavelength. For CO<sub>2</sub> measurements, for instance a filter with a centre wavelength of 4.26  $\mu\text{m}$  and a bandwidth of 90...180 nm is commonly used (see figure 1). Often an additionally reference channel is used to cancel intensity shifts of the IR emitter.

Different methods are developed to analyse mixtures with different substances simultaneously. One is the known filter wheel method. A plurality

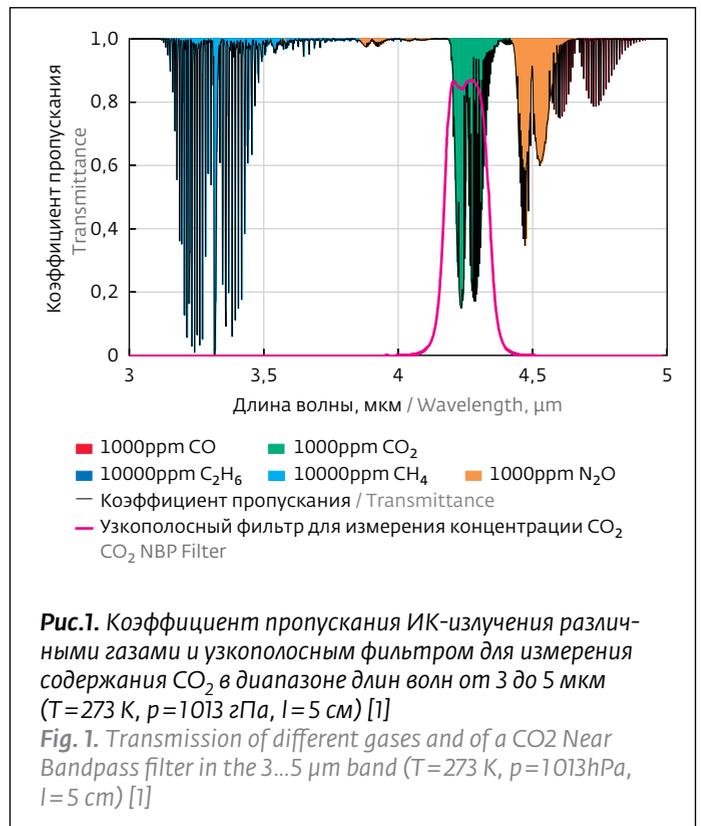
нов длин волн 5,0–3,7 мкм и 4,3–3,0 мкм соответственно. Пирозлектрические кристаллы покрыты слоем черного поглощающего материала и обладают плоской спектральной характеристикой. Датчики с делителем пучка позволяют анализировать состав газовой смеси по нескольким компонентам одновременно, тогда как датчики с перестраиваемым фильтром определяют содержание компонентов газовой смеси последовательно.

## ВВЕДЕНИЕ

В основе работы ИК-газоанализаторов лежит свойство газов селективно поглощать ИК-излучение определенных длин волн. Концентрация того или иного газа определяется путем измерения величины ослабления излучения с определенными длинами волн, которые соответствуют электронным переходам в молекулах обнаруживаемого газа. На рис.1 представлен спектр селективного поглощения ИК-излучения в диапазоне длин волн от 3 до 5 мкм для монооксида углерода, диоксида углерода, пропана, метана и оксида азота (I).

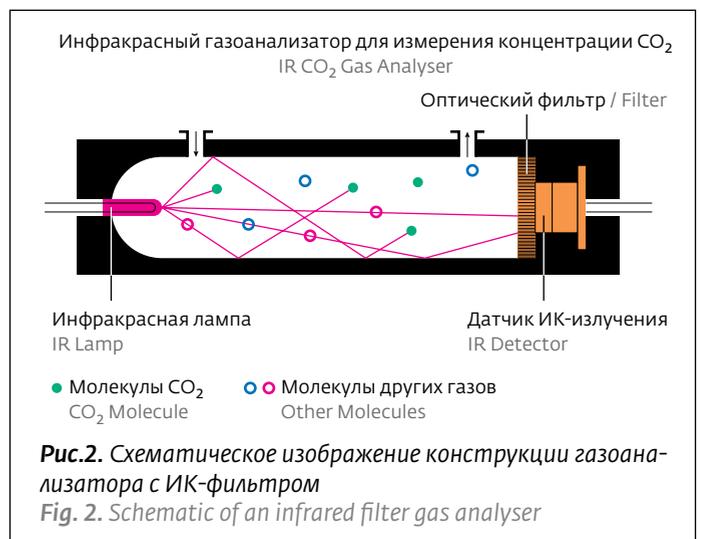
Методы анализа спектра излучения широкополосных излучателей с помощью оптических фильтров играют важную роль в задачах газового анализа в промышленности и медицине. Достаточно часто использование фотометров с оптическими фильтрами относят к числу недисперсионных методов анализа. Это не совсем верно, поскольку действие фильтров основано на явлении интерференции [2].

Схема газоанализатора (рис.2) включает: пробоотборную камеру, в которую закачивается исследуемая газовая смесь, источник ИК-излучения и датчик измерения количества поглощенного излучения. Пирозлектрические датчики находят широкое применение благодаря таким преимуществам, как возможность работы при комнатной температуре без охлаждения, высокой надежности, линейному характеру спектральной чувствительности и низким эксплуатационным затратам. Узкополосные фильтры ИК-излучения выбирают в зависимости от анализируемых веществ. Полоса пропускания фильтра намного шире отдельной линии поглощения и может составлять несколько процентов от центральной длины волны. Например, для измерения содержания  $\text{CO}_2$  обычно используют фильтр с центральной длиной волны 4,26 мкм и полосой пропускания от 90 до 180 нм (см. рис.1). Зачастую дополнительно используют сравнительный (эталонный) измерительный канал для компенсации погрешностей измере-



of filters, each of which transmit radiation at an absorption band of a gas component to be detected, are alternately positioned in the radiation path to produce a time-multiplexed signal having the concentration information for all gases.

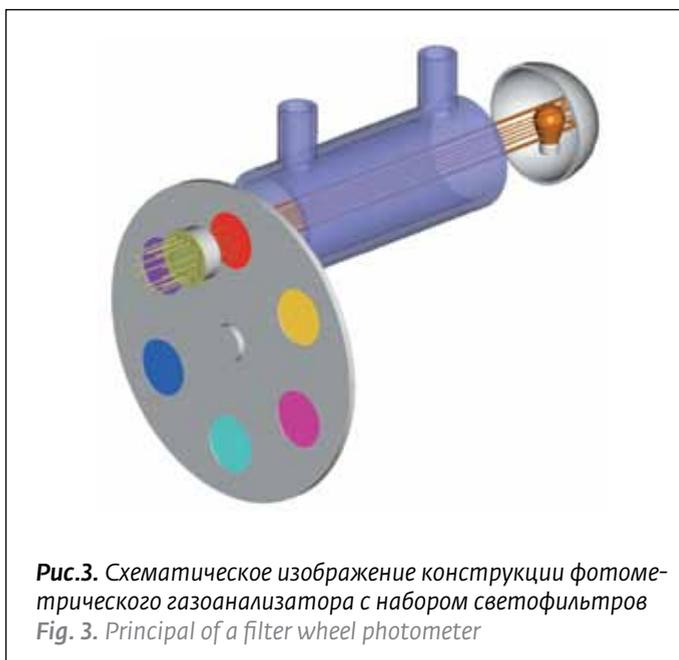
Detectors with separate spectral channels are developed to overcome the drawbacks of size, power consumption and mechanical sensitivity of the filter wheel method. A simple approach is the combination of several detection units



ний, связанных с изменениями интенсивности излучения, создаваемого ИК-излучателем.

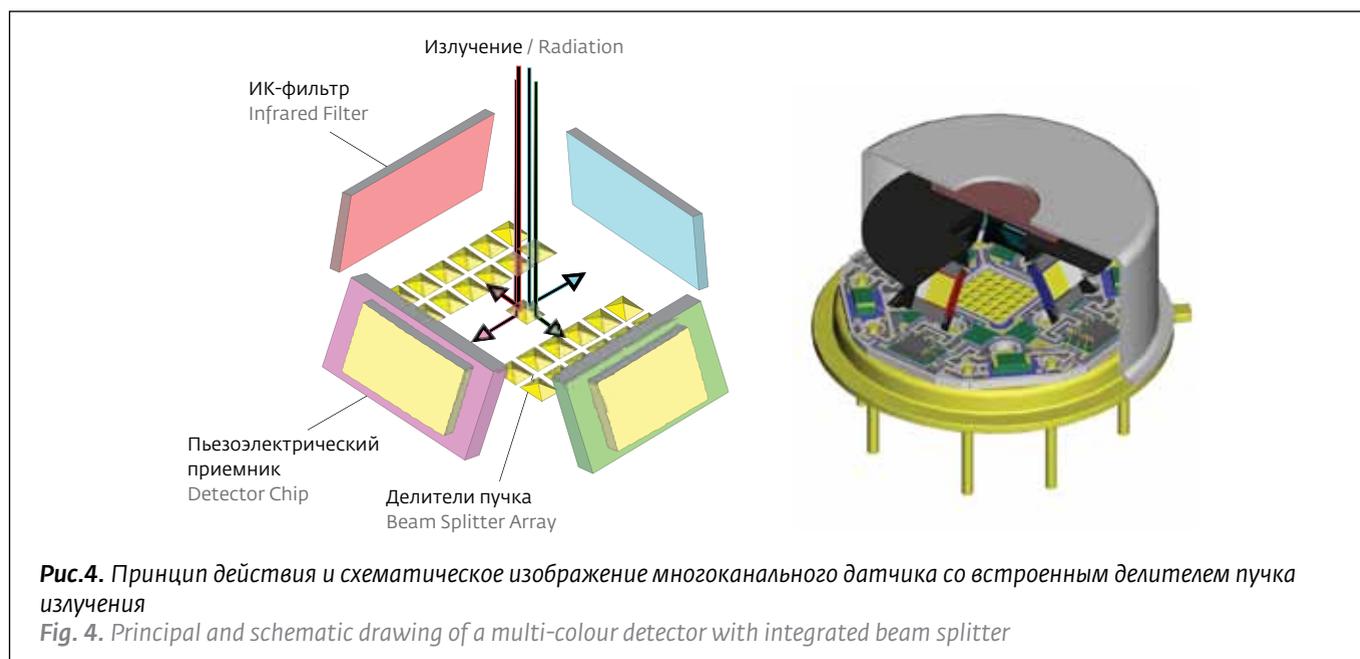
Для одновременного измерения концентрации нескольких компонентов в многокомпонентных газовых смесях разработано множество различных методов. Один из наиболее распространенных – фотометрический метод анализа с использованием диска со светофильтрами. Каждый фильтр пропускает излучение только с теми длинами волн, которые соответствуют спектру поглощения одного из компонентов газовой смеси. Фильтры поочередно устанавливаются на выходе пробоотборной камеры, и в результате формируется мультиплексированный сигнал, содержащий информацию о концентрации всех компонентов газовой смеси.

Тем не менее, метод анализа с использованием диска со светофильтрами имеет ряд недостатков, как то: большие размеры конструкции, высокое энергопотребление, чувствительность к механическим воздействиям и износ механических компонентов. Датчики с отдельными спектральными каналами лишены этих недостатков. Казалось бы, самое простое решение – поместить несколько приемников излучения в один корпус и получить многоканальный датчик. Однако при этом узкополосные фильтры будут расположены в одной плоскости. Следовательно, потребуется газовая кювета большего диаметра. Может возникнуть и другая проблема – неравномерность потока излучения, вызванная изменениями отражающей способности стенок кюветы или смещением



**Рис.3.** Схематическое изображение конструкции фотометрического газоанализатора с набором светофильтров  
*Fig. 3. Principal of a filter wheel photometer*

in a common package to form a multi-colour detector. The narrowband filters are arranged in one plane. Therefore, the diameter of the gas cell is increased. An additional problem appears from radiation unbalance caused by inhomogeneous changes of the reflectance of the cell wall or from changes of the position of the radiation emitter for instance of the filament of a incandescent lamp. InfraTec provides two solutions for this problem with a parallel and a serial spectral filter mode:



**Рис.4.** Принцип действия и схематическое изображение многоканального датчика со встроенным делителем пучка излучения  
*Fig. 4. Principal and schematic drawing of a multi-colour detector with integrated beam splitter*

источника излучения. Компания InfraTec предлагает два типа датчиков, конструкция которых исключает появление подобной проблемы. Это: многоканальный датчик со встроенным делителем пучка излучения и датчик с изменяемой полосой пропускания на основе перестраиваемого фильтра Фабри-Перо.

### МНОГОКАНАЛЬНЫЙ ДАТЧИК

Принцип действия многоканального датчика со встроенным делителем пучка показан на рис.4. Проходящий через апертурную диафрагму поток ИК-излучения попадает на делитель пучка и разделяется на четыре части. Каждый отраженный пучок проходит через ИК-фильтр и падает на пироэлектрический приемник. Делители пучка представляют собой пластины, на поверхности которых методом микрообработки сформированы микроструктуры, расположенные с шагом 100 или 150 мкм для обеспечения равномерного распределения потока излучения. Поверхность делителей пучка позолочена. Фильтры установлены под определенным углом, чтобы отраженное излучение падало на них перпендикулярно. Такая конструкция предотвращает смещение кривой пропускания фильтра в область более коротких волн и исключает влияние противоположного фильтра.

В отличие от других многоканальных датчиков, у датчика с делителем пучка всего одна апертурная диафрагма, что позволяет использовать газовую кювету меньшего диаметра и, следовательно, пробы меньшего объема. Это в свою очередь ускоряет процесс обновления пробы газа и позволяет использовать сенсорные модули меньшего размера. Помимо четырехканальных датчиков с делителями пучка в виде четырехугольных микропирамид, компания InfraTec выпускает двухканальные датчики с делителями пучка с микроструктурой в виде V-образных канавок. На рисунках 5 (а) и 5 (б) представлены снимки поверхности делителя пучка в двухканальном и четырехканальном датчике, полученные с помощью растрового электронного микроскопа (РЭМ). Несмотря на то, что шаг расположения V-образных канавок и пирамид варьируется от 100 до 150 мкм, угол наклона граней

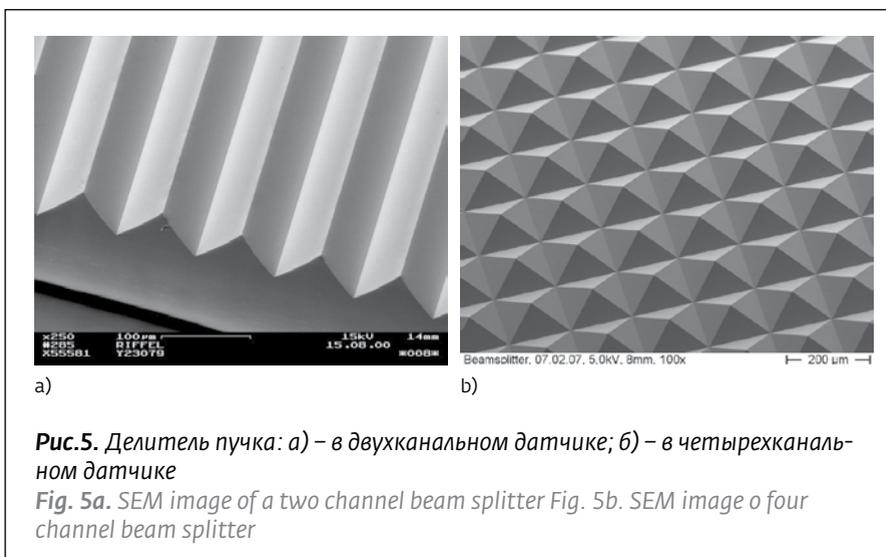


Рис.5. Делитель пучка: а) – в двухканальном датчике; б) – в четырехканальном датчике

Fig. 5a. SEM image of a two channel beam splitter Fig. 5b. SEM image of four channel beam splitter

- the multi-colour detector with integrated beam splitter and
- the tunable-colour detector with integrated Fabry-Perot filter

### MULTI-COLOR DETECTOR

The principle of the multi-colour detector with integrated beam splitter is shown in figure 4. The IR radiation entering through the aperture stop is divided by a beam splitter in four parts. Each of the partial beam is going through an IR filter and hits a pyroelectric detector chip. The beam splitters are made of gold plated microstructures with a pitch of 100  $\mu\text{m}$  or 150  $\mu\text{m}$  respectively, to achieve a homogeneous distribution of the radiance. The filters are arranged under a certain angle to obtain a normal incidence of the radiation. This assembling avoids the drifting of the filter transmission curves to shorter wavelengths and the influence of the opposite filter

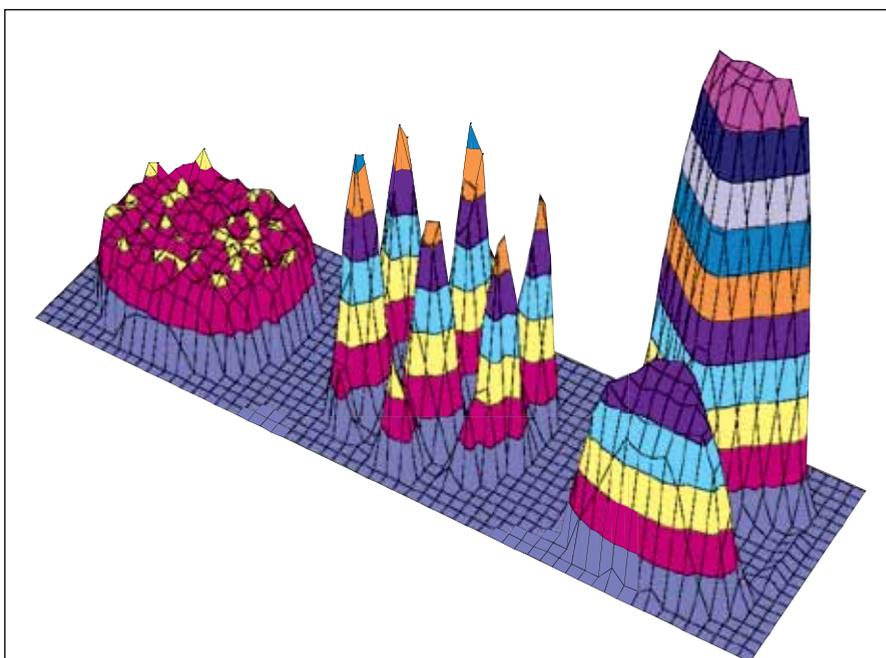
As the beam splitter detector compared to other multi-channel detectors has only one aperture stop, it is possible to use a gas cell with a smaller diameter reducing the gas volume. A smaller gas volume reduces the size of the sensor module and accelerates the gas-exchange. In addition to four-channel beam splitter detectors using four-sided micro pyramids, InfraTec also applies two-channel detectors based on micro V-grooves. In fig.5 SEM images of two - and four-channel beam splitters are shown. Whereas the pitch of the V-grooves and the pyramids is varying between 100  $\mu\text{m}$  and 150  $\mu\text{m}$ , the tilt angle amounts 30°. During manufacturing it is essential to realize extremely sharp edges to minimize the reflection deviating from 30°.

всегда постоянный и составляет  $30^\circ$ . При изготовлении важно получить очень острые грани, чтобы минимизировать отклонения величины угла отражения от  $30^\circ$ .

На рис.6 показано пространственное распределение чувствительности отдельного канала датчика с разными типами делителей пучка. Измерения проводились путем сканирования апертуры  $2,5$  мм лазерным пятном диаметром  $100$  мкм. Слева на рисунке показано распределение чувствительности при использовании делителя пучка в виде структуры из пирамид размером  $10 \times 10$  и кассеты с фильтрами с углом наклона сторон  $30^\circ$ . В центре показано распределение чувствительности при использовании делителя пучка в виде структуры из пирамид размером  $4 \times 4$  и кассеты с фильтрами с углом наклона сторон  $30^\circ$ . Справа показано распределение чувствительности при использовании делителя пучка в виде одной четырехугольной пирамиды и кассеты с фильтрами с углом наклона сторон  $15^\circ$ . Делитель пучка в виде структуры из микропирамид размером  $4 \times 4$  не обеспечивает требуемой однородности чувствительности, тогда как при использовании структуры из микропирамид размером  $10 \times 10$  происходит надлежащее образование отдельных пучков излучения, что в свою очередь обеспечивает достаточную однородность чувствительности. По рисунку справа можно сделать заключение о полной непригодности конструкции с одной пирамидой и кассетой, в которой на фильтр дополнительно попадает часть отраженного излучения с противоположного фильтра. При таком распространении лучей возникают паразитные сигналы.

### ДАТЧИК С ПЕРЕСТРАИВАЕМОМ ФИЛЬТРОМ

Принцип действия датчика с перестраиваемым фильтром схематически показан на рис.7. Перестраиваемый фильтр представляет собой микро-



**Рис.6.** Пространственное распределение относительной чувствительности отдельного канала датчика с разными типами делителей пучка и кассет с фильтрами (слева: делитель пучка в виде структуры из микропирамид размером  $10 \times 10$  и кассета с углом наклона сторон  $30^\circ$ ; в центре: делитель пучка в виде структуры из микропирамид размером  $4 \times 4$  и кассета с углом наклона сторон  $30^\circ$ ; справа: делитель пучка в виде отдельной пирамиды и кассета с углом наклона сторон  $15^\circ$ )

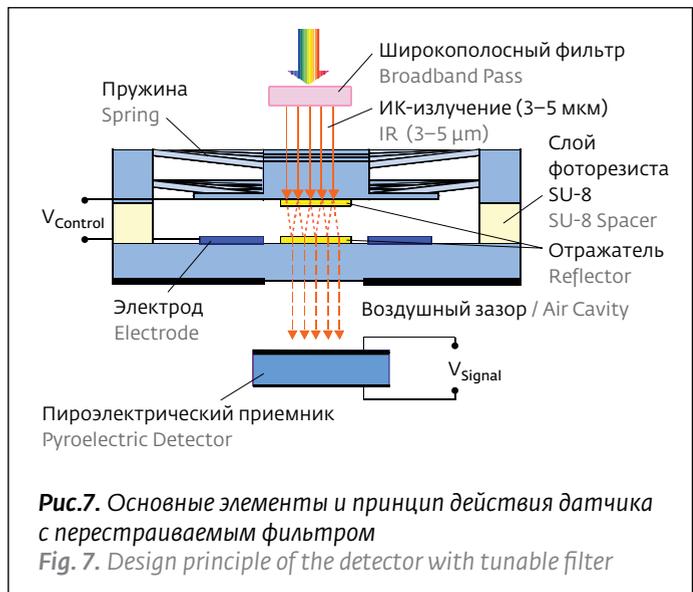
**Fig. 6** Spatial distribution of the relative responsivity of a single channel with different types of beam splitter designs and arrangements of beam splitters (left:  $10 \times 10$  micro pyramid beam splitter /  $30^\circ$ -filter cage, centre:  $4 \times 4$  micro pyramid beam splitter /  $30^\circ$ -filter cage, right: single pyramid beam splitter /  $15^\circ$  filter cage)

In fig 6 the spatial sensitivity distribution of one single channel of a beam splitter detector with different types of beam splitter designs and arrangements of beam splitters is demonstrated. The measurement was conducted by scanning the aperture of  $2.5$  mm by a laser spot with a diameter of  $100 \mu\text{m}$ . The left picture shows the responsivity distribution using a  $10 \times 10$  pyramid structure and a  $30^\circ$  filter cage, whereof in the centre a  $4 \times 4$  pyramid structure and a  $30^\circ$  filter cage was used. On the right a single four-sided pyramid and a  $15^\circ$  filter cage was used. Using a beam splitter with remarkably larger and in a  $4 \times 4$  grid arranged micro pyramids the homogeneity is unsatisfactory, however the application of a beam splitter with  $10 \times 10$  micro pyramids leads to a sufficient composition of the single beams, resulting in a good homogeneity of the responsivity. The right hand figure shows that a single pyramid and a filter cage, which additionally uses the reflected fraction of the opposite filter, is completely

электромеханическую систему (МЭМС, MEMS) с резонатором Фабри-Перо. Держатели зеркал резонатора имеют сравнительно большую толщину; один держатель неподвижен, а второй подвешен на пружинах и может перемещаться по вертикали. Пластины с вытравленными элементами МЭМС и специальным покрытием соединяются непосредственно друг с другом или разделяются слоем фоторезиста SU-8. Такая конструкция имеет среднюю сложность изготовления. Регулирование воздушного зазора между зеркалами резонатора осуществляется электростатическим полем: управляющее напряжение подается между верхним зеркалом и электродом на нижнем держателе.

Перестраиваемый фильтр установлен над пироэлектрическим приемником, обладающим плоской характеристикой спектральной чувствительности (рис.8). Приемник и перестраиваемый фильтр заключены в корпус ТО-8 с широкополосным оптическим фильтром. Широкополосный оптический фильтр пропускает только излучение с длинами волн, лежащими в диапазоне перестройки фильтра Фабри-Перо, и блокирует более высокие порядки интерференции и длинноволновое излучение.

Ключевым элементом перестраиваемого фильтра ИК-излучения является стандартный интерферометр Фабри-Перо, выполненный по технологии MEMS (МЭМС - микроэлектромеханические системы). Он представляет собой оптический резонатор, состоящий из двух параллельных зеркал, расположенных на расстоянии  $d$  друг от друга. Среда между зеркалами имеет показатель преломления  $n$ . Изменяя расстояние между

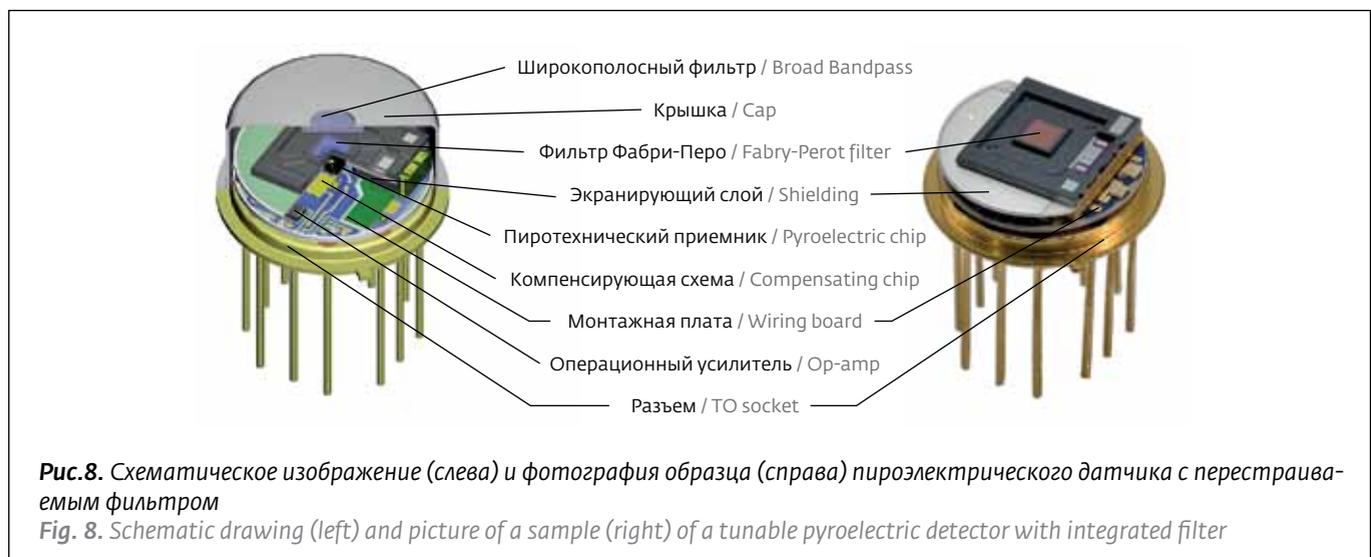


**Рис.7.** Основные элементы и принцип действия датчика с перестраиваемым фильтром  
**Fig. 7.** Design principle of the detector with tunable filter

inapplicable. This beam guiding originates "ghost" figures.

### TUNABLE-COLOR DETECTOR

The design principle of the tunable-colour detector is shown in figure 7. The tunable filter is a MEMS based fabry-perot filter. It is based on an approach using relatively thick reflector carriers, one of them being fixed and the other suspended by springs which allow vertical movement. A set-up of coated and etched wafer is bonded directly or by an intermediate SU-8 layer. This yields in medium fabrication complexity. In order to achieve the tuning of the resonator cavity, an electrostatic actuation using a parallel plate design has been chosen.



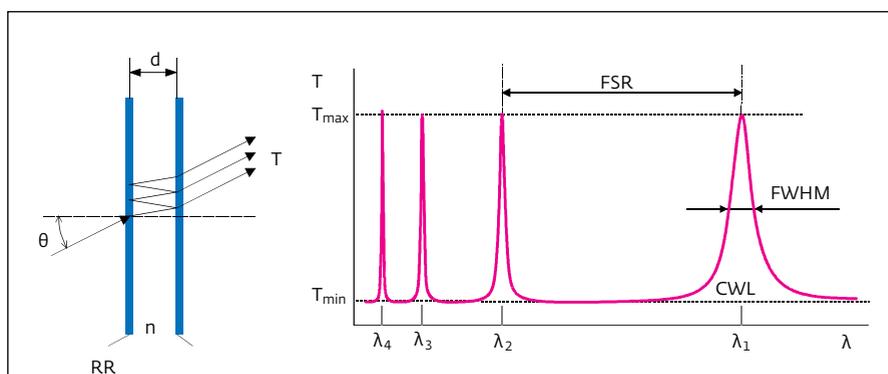
**Рис.8.** Схематическое изображение (слева) и фотография образца (справа) пироэлектрического датчика с перестраиваемым фильтром  
**Fig. 8.** Schematic drawing (left) and picture of a sample (right) of a tunable pyroelectric detector with integrated filter

зеркалами, можно регулировать положение полосы пропускания фильтра. На рис.9 схематически показан принцип действия резонатора и изображена зависимость пропускания интерферометра от длины волны  $\lambda$ .

Для перестройки фильтра между 5 мкм и 3 мкм требуется порядок интерференции  $m=1$  и изменение расстояния между зеркалами резонатора  $d$  приблизительно с 2500 нм до 1500 нм. Для полос пропускания 100–50 нм требуется точность (отношение FSR к FWHM) от 40 до 80 или отражательная способность зеркал от 92 до 96% соответственно.

Для создания широкополосных отражателей обычно используют распределенные брэгговские отражатели (РБО) [3]. Брэгговские отражатели получают чередованием слоев из материалов с низким (L) и высоким (H) показателем преломления. Оптическая толщина каждого слоя равна четверти длины волны (QWOT, Quarter-Wave Optical Thickness). Таким образом формируются периоды чередования LH (период РБО). Для того чтобы создать широкую зону с большим коэффициентом отражения в диапазоне длин волн от 3 до 5 мкм даже с малым периодом РБО, необходимо использовать тонкие пленки с максимально возможным отношением показателей преломления  $n_H/n_L$ . На рис.10 представлена зависимость коэффициента отражения брэгговских отражателей с разным числом периодов чередования от отношения показателей преломления  $n_H/n_L$  для опорной длины волны 3,5 мкм. Кроме того, для отражателя с периодом 2 показана зависимость ширины полосы пропускания (при коэффициенте отражения 90%) от отношения показателей преломления  $n_H/n_L$ .

Для изготовления отражателей в качестве материала с низким показателем преломления был использован диоксид кремния с показателем преломления 1,38 при длине волны 4 мкм, а в качестве материала с высоким показателем преломления был использован поликристаллический кремний с показателем преломления 3,33 при длине волны 4 мкм. Для получения слоев был использован метод химического осаждения из газовой фазы (ХОГФ, CVD, Chemical Vapor



**Рис. 9.** Схематическое изображение и спектр пропускания интерферометра Фабри-Перо FSR: Free Spectral Range (область свободной дисперсии); FWHM: Full Width at Half Measure (полная ширина на уровне половинной амплитуды); CWL: Centre Wavelength (центральная длина волны)

**Fig. 9.** Schematic arrangement principle and transmission spectra of the Fabry-Perot interferometer (FSR: Free Spectral Range; FWHM: Full Width at Half Measure; CWL: Centre Wavelength)

The tunable filter is arranged on top of a pyroelectric detector with a flat spectral response, shown in figure 8. Both, the tunable filter and the detector, are packaged in a TO-8 housing with a broad bandpass filter. The broad bandpass filter transmits only in the tuning range of the filter and blocks higher interference orders and long wave radiation.

A classical Fabry-Perot interferometer is the key element of the MEMS based tunable IR filter, which is built up of an optical resonator consisting of two coplanar reflectors with a separation distance  $d$  and a material with a refractive index  $n$  in between them. By varying the separation distance  $d$ , the filter can be spectrally tuned. In figure 9 the set-up principle and the transmission as function of the wavelength  $\lambda$  is presented.

The tunability of the filter between 5  $\mu\text{m}$  and 3  $\mu\text{m}$  requires an order number  $m = 1$  and a physical adjustment of the resonator cavity with a distance  $d$  of about 2500 nm to 1500 nm. Bandwidths of 100...50 nm require a finesse (the ratio of FSR to FWHM) between 40...80 or a reflectance of the coplanar reflectors of 92...96% respectively.

Distributed Bragg reflectors are commonly used to generate a broadband reflector [3]. Bragg reflectors are built up by alternating quarter wave optical thickness (QWOT) layers with low (L) and high (H) refractive index, forming a (LH) periods. In order to generate a broad high reflective zone from 3...5  $\mu\text{m}$  even with a low period number, thin films with as high as possible refractive index ratio  $n_H/n_L$  have to be applied. This is shown in fig. 10,

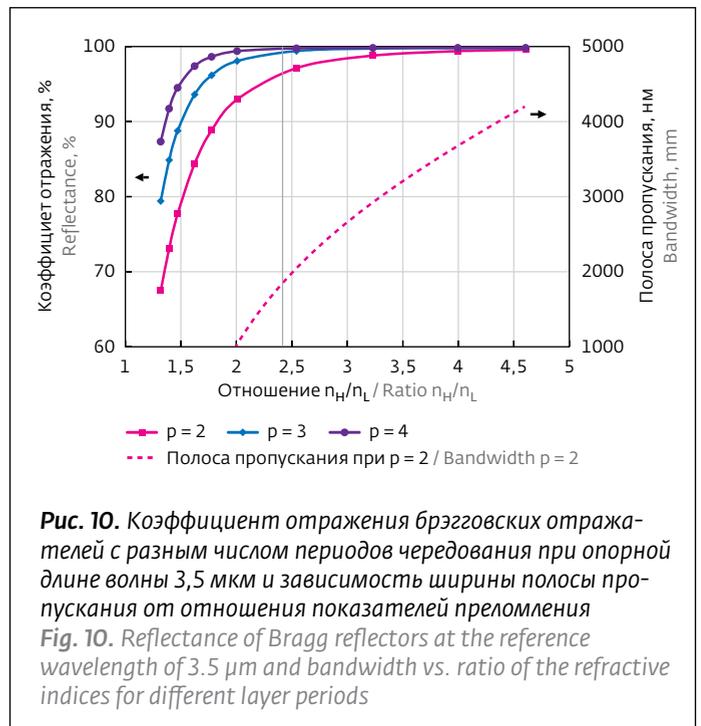
Deposition). Большая величина отношения показателей преломления  $n_H/n_L$ , равная 2,41, позволила уже из двух пар слоев  $(LH)^2$  получить широкую зону с большим коэффициентом отражения для диапазона длин волн 3–5 мкм. Средний и максимальный коэффициенты отражения составили 95% и 96% соответственно [4].

При увеличении числа периодов РБО до трех средний и максимальный коэффициенты отражения увеличиваются до 98% и 99% соответственно, а характеристика зоны с высоким коэффициентом отражения принимает более прямоугольную форму (см. рис. 11). Однако при этом в структуре из трех пар слоев увеличивается шероховатость поверхности пленок, из-за чего заметно снижается производительность [5]. В связи с этим в качестве брэгговского отражателя была выбрана структура с двумя парами слоев  $(LH)^2$ , а спектральный диапазон 3–5 мкм был разделен на два поддиапазона: 3,0–4,3 мкм и 3,7–5,0 мкм.

На обратную сторону пластины было нанесено просветляющее покрытие для уменьшения потерь на отражение и пульсаций в области с высоким коэффициентом отражения, вызванных многократными отражениями в кремниевой подложке. Как можно видеть на рис.12а, просветляющее покрытие с одним четвертьволновым слоем дает минимальный коэффициент отражения только при опорной длине волны. Многослойная структура, наоборот, увеличивает коэффициент пропускания в более широком диапазоне длин волн. В этой конструкции используется только четвертьволновый слой диоксида кремния в качестве первого слоя и тонкие пленки диоксида кремния и поликристаллического кремния, в которых выполняется условие  $n_d \ll \lambda$ , для обеспечения среднего значения коэффициента отражения [6].

Трехслойное просветляющее покрытие на основе пленок высокой чистоты имеет средний коэффициент отражения 0,6% во всем спектральном диапазоне 3–5 мкм. Минимальный коэффициент отражения составляет 0,3%. На рисунке 12б также можно видеть, что вне области опорной длины волны многослойное просветляющее покрытие уменьшает амплитуду пульсаций и увеличивает коэффициент пропускания намного лучше, чем однослойное просветляющее покрытие.

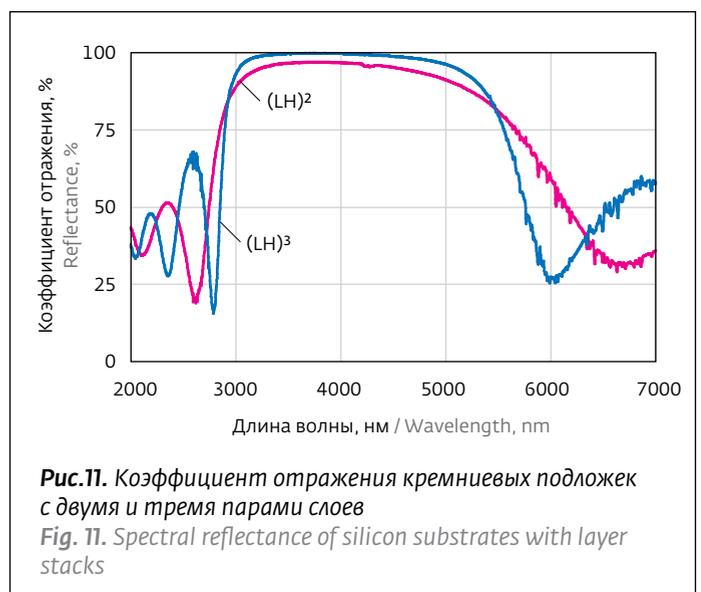
Для достижения оптимальных условий интерференции фильтр Фабри-Перо изготовлен с применением технологии объемной микрообработки. Оправки обоих зеркал (неподвижного



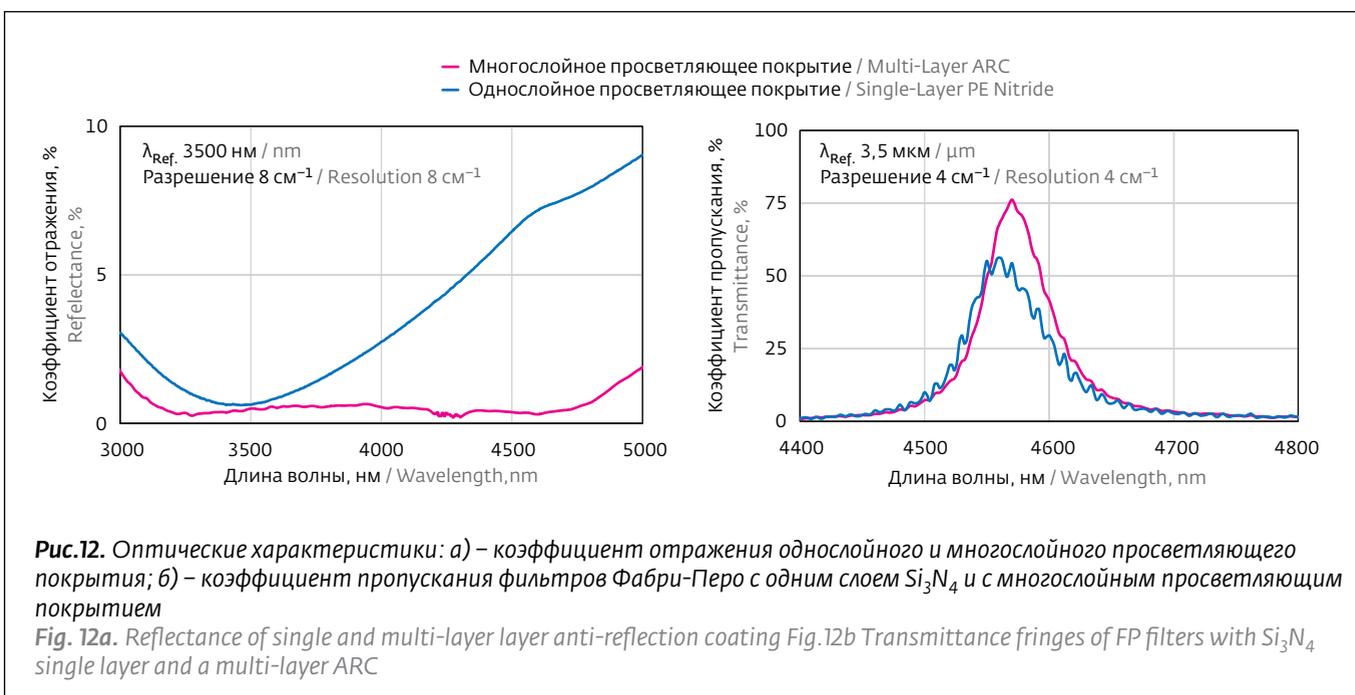
**Рис. 10.** Коэффициент отражения брэгговских отражателей с разным числом периодов чередования при опорной длине волны 3,5 мкм и зависимость ширины полосы пропускания от отношения показателей преломления  
**Fig. 10.** Reflectance of Bragg reflectors at the reference wavelength of 3.5  $\mu\text{m}$  and bandwidth vs. ratio of the refractive indices for different layer periods

in which the reflectance of a Bragg reflector with different layer periods at the reference wavelength (3.5  $\mu\text{m}$ ) is plotted against the ratio of the refractive indices,  $n_H/n_L$ . Additionally, the bandwidth (at 90% reflectance) of a reflector with period number of 2 is calculated against the ratio of the refractive indices,  $n_H/n_L$ .

Silicon dioxide with a refractive index of 1.38 at 4  $\mu\text{m}$  is used as low refractive index material and polycrystalline silicon with a refractive index of 3.33 at 4  $\mu\text{m}$  is used as high refractive index material



**Рис. 11.** Коэффициент отражения кремниевых подложек с двумя и тремя парами слоев  
**Fig. 11.** Spectral reflectance of silicon substrates with layer stacks

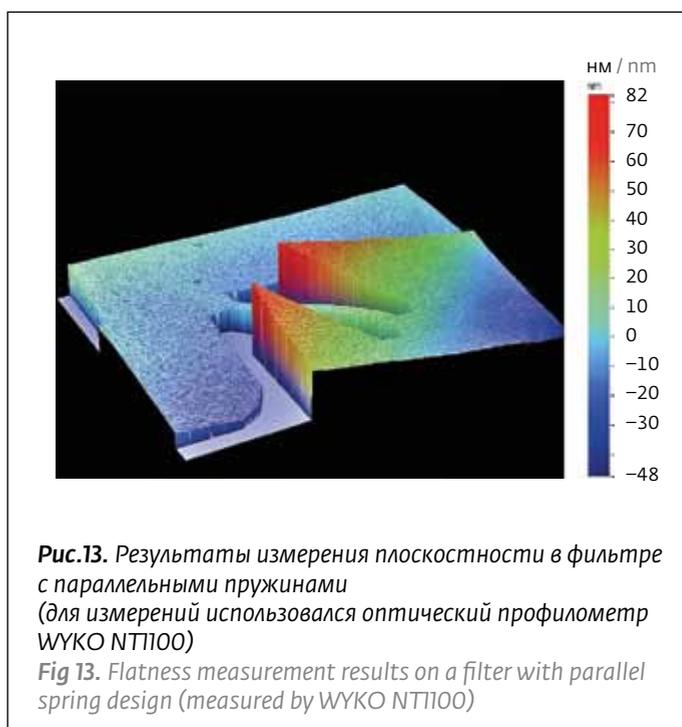


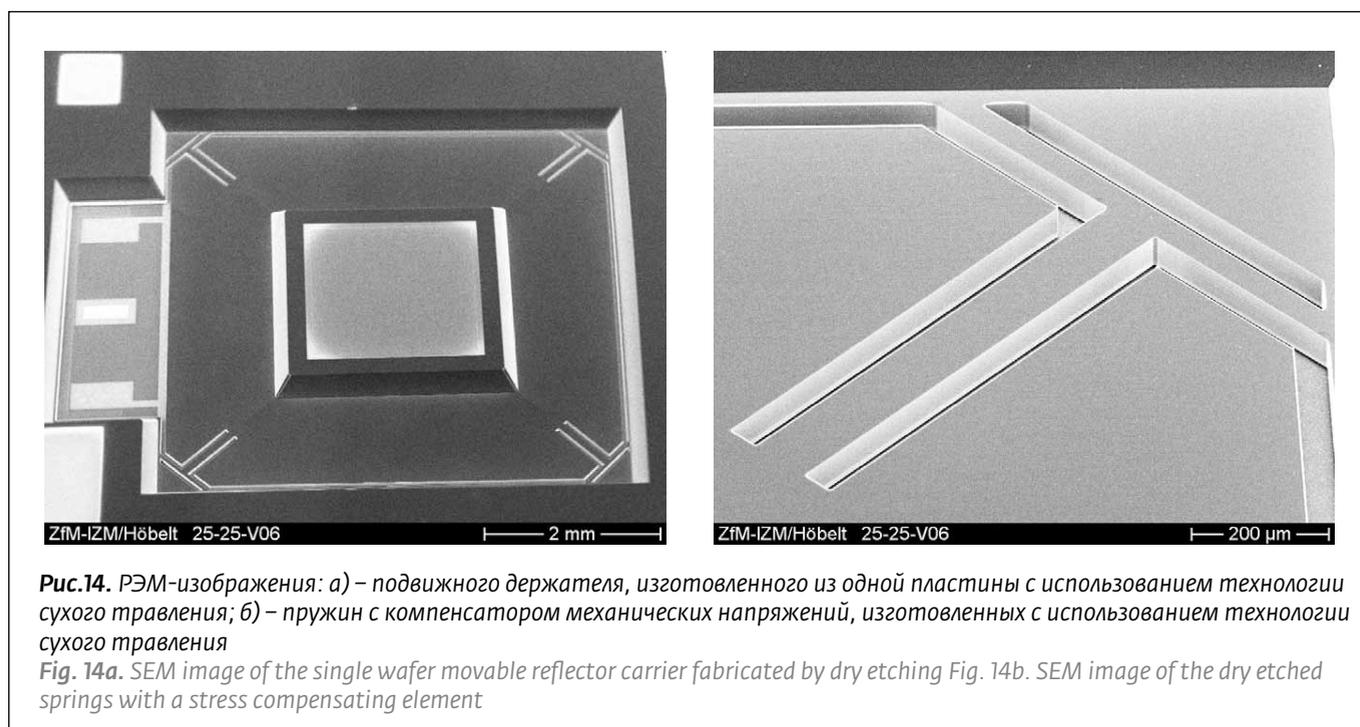
и подвижного) изготовлены из кремниевых пластин толщиной 300 мкм с высоким удельным сопротивлением. Неподвижный отражатель находится в центре и окружен управляющими электродами. Подвижный отражатель удерживается диагонально направленными пружинами, расположенными в углах внешней рамки. Было изготовлено несколько различных подвижных отражателей на пружинах для определения оптимальной конструкции с точки зрения максимального диапазона перестройки фильтра, минимального влияния силы тяжести на центральную длину волны и ширину полосы пропускания, минимального отклонения отражателей от параллельности под действием механических напряжений, а также невысокой сложности изготовления [7]. Конструкция с параллельными пружинами обеспечивает почти идеальное перемещение в вертикальном направлении. Но это только при отсутствии механических напряжений и деформаций в плоскости пластины. Напряжения в продольном направлении не компенсируются пружинами. Они приводят к деформации пружины в вертикальном направлении, как показано на рис.13.

Одним из вариантов решения данной проблемы является использование пружин с компенсаторами механических напряжений, как показано на рис.14а, б. Т-образные компенсаторы способствуют уменьшению механических напряжений в продольном направлении, поскольку

for the reflectors. The layers are deposited by CVD processes. Because of the high ratio of refractive indexes  $nH/nL$  of 2.41 a wide high-reflective zone from 3...5  $\mu$ m with a high average and maximum reflectance of about 95% and of 96% respectively was obtained already with a  $|LH|^2$  layer stack [4].

Increasing the period number to 3 the average and maximum reflectance increases to 98% and





могут изгибаться в поперечном направлении. Преимуществами такой конструкции являются простота и надежность технологии, большая свобода выбора параметров конструкции и высокая точность изготовления пружин. Технология сухого травления позволяет изготавливать миниатюрные пружины с очень малой шириной прорезей. Следовательно, пружины будут занимать очень мало места даже в фильтрах со сложной конфигурацией, и для электростатического управления может быть использована большая площадь пластины. В сочетании с жидкостным травлением для регулирования толщины пружины можно с высокой точностью изготавливать конструкции требуемой массы.

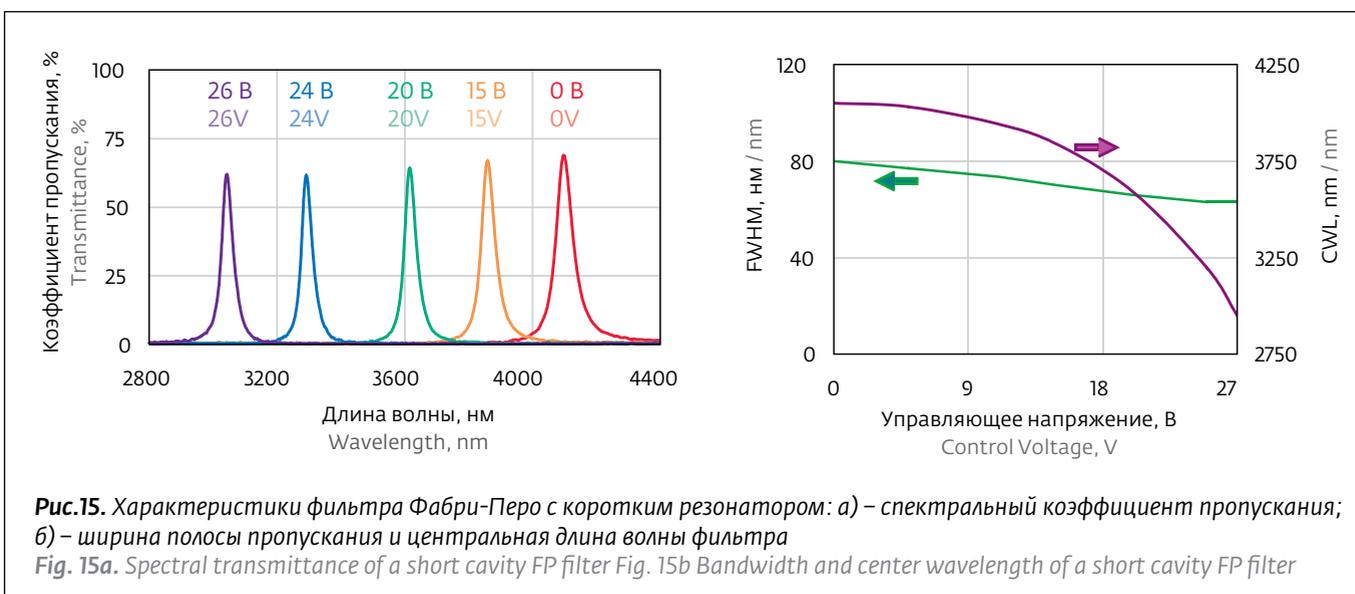
Результаты измерения коэффициентов пропускания фильтров с коротким и длинным резонатором, представленные на рис.15, 16, подтверждают, что при использовании такой конструкции фильтра достигается высокий коэффициент пропускания и узкая полоса пропускания. Значения FWHM для фильтров с длинным и коротким резонатором составили, соответственно,  $100 \pm 20$  нм и  $80 \pm 20$  нм. Зависимость центральной длины волны от напряжения имеет вид стандартного графика функции квадратного корня. Уменьшение коэффициента пропускания во время перестройки фильтра происходит из-за отклонения подвижного отражателя от горизонтального положения, которое можно объяснить разной

99% respectively and squares the high reflection zone (see fig. 11). Otherwise the roughness of the stack increases, resulting in a remarkable worse performance [5]. Hence a double-stack |LH|2 was chosen as Bragg reflector and the spectral range of 3...5  $\mu\text{m}$  was divided in two sub-ranges with each 1300 nm from 3.0...4.3  $\mu\text{m}$  und 3.7...5.0  $\mu\text{m}$ .

The backsides of the wafer were anti-reflection coated to reduce reflection losses and ripples in the high reflective band caused by multiple reflections in the silicon substrate. Single QWOT layers show a reflectance minimum only at the reference wavelength, which is presented fig. 12a. Alternatively a multi-layer design increases the transmittance in a broader wavelength range. This design uses only a QWOT silicon dioxide layer for the first layer and very thin films of silicon dioxide and polycrystalline silicon fulfilling the condition  $n_d \ll \lambda$  to match a medium refractive index [6].

The reflectance of the refined triple-layer ARC has an average of 0.6% in the hole spectral range of 3...5  $\mu\text{m}$  and a minimum of 0.3%. In fig. 12b, it is also shown that the multi-layer ARC reduces the ripple amplitude and increases the transmittance much better than a single layer ARC out of range of the reference wavelength.

The FP filter is fabricated by bulk micromachining technology to achieve optimum interference conditions. High resistivity silicon wafers with a thickness of 300  $\mu\text{m}$  are used as carriers for



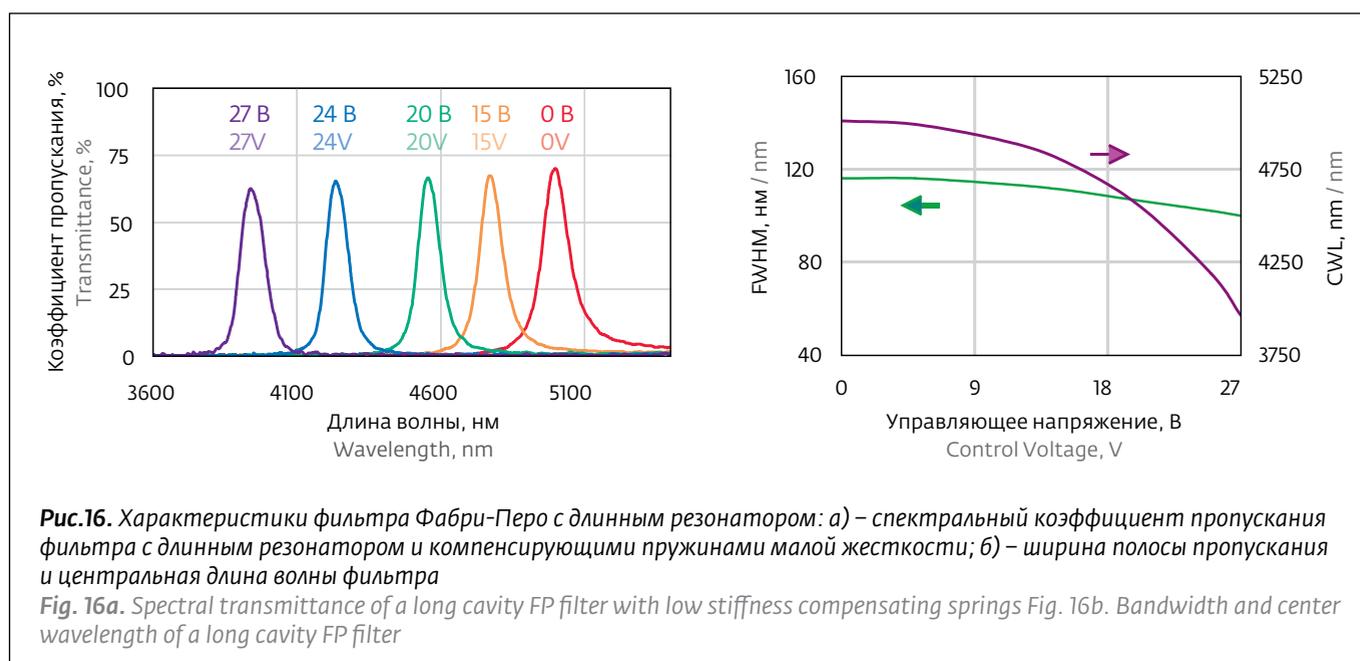
**Рис.15.** Характеристики фильтра Фабри-Перо с коротким резонатором: а) – спектральный коэффициент пропускания; б) – ширина полосы пропускания и центральная длина волны фильтра  
**Fig. 15a.** Spectral transmittance of a short cavity FP filter **Fig. 15b.** Bandwidth and center wavelength of a short cavity FP filter

жесткостью пружин и неоднородностью электрического поля. Использование в конструкции фильтра пружин с компенсирующими элементами позволило добиться диапазона перестройки около 1300 нм при максимальном управляющем напряжении 27 В.

### СРАВНЕНИЕ ПИРОЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ДАТЧИКОВ С НЕСКОЛЬКИМИ ФИЛЬТРАМИ (МНОГОКАНАЛЬНЫХ) И С ПЕРЕСТРАИВАЕМЫМ ФИЛЬТРОМ

Датчики обоих типов могут работать в схемах (режимах) с усилением тока, и с усилением

both the fixed and the movable reflector. The fixed reflector is located in the centre surrounded by the driving electrodes. The movable reflector is suspended by diagonally arranged springs located in the corners of the outer frame. Various types of movable reflectors and spring configurations have been fabricated to determine the optimum solution with respect to maximum tuning range, low gravity influence on centre wavelength and filter bandwidth, low deviation of reflector parallelism by mechanical stress and low fabrication complexity [7]. The parallel spring design results in a nearly ideal movement in vertical direction. But this is



**Рис.16.** Характеристики фильтра Фабри-Перо с длинным резонатором: а) – спектральный коэффициент пропускания фильтра с длинным резонатором и компенсирующими пружинами малой жесткости; б) – ширина полосы пропускания и центральная длина волны фильтра  
**Fig. 16a.** Spectral transmittance of a long cavity FP filter with low stiffness compensating springs **Fig. 16b.** Bandwidth and center wavelength of a long cavity FP filter



напряжения. Соответствующие схемы представлены на рис.17. При идентичных основных условиях работы удельная способность обнаружения  $D^*$  пироэлектрических датчиков в обоих режимах одинакова. Тем не менее, режим с усилением тока имеет некоторые преимущества, поэтому для датчиков с перестраиваемым фильтром данный режим является предпочтительным. АЧХ достаточно плоская вплоть до частоты среза, которая может лежать в диапазоне от 10 до 1000 Гц [8].

В многоканальных датчиках поток излучения, проходящий через апертурную диафрагму, разделяется на две или четыре части. Однако процессы разделения пучка излучения и спектральной фильтрации происходят одновременно. В датчиках с перестраиваемым фильтром спектральная фильтрация происходит последовательно, так как анализу подвергается весь поток излучения, проходящий через апертурную диафрагму. Узкополосные фильтры в многоканальных датчиках также основаны на конструкции фильтра Фабри-Перо. В них также используется резонатор с отражателями на основе четвертьволновых (QWOT) диэлектрических слоев. В отличие от перестраиваемого фильтра Фабри-Перо, узкополосные фильтры могут содержать несколько связанных

only the case, if the assembling of the planes succeeds tension and warping free. Tensions in lengthwise direction cannot be compensated by the springs. They lead to a deformation of the spring in vertical direction shown in fig. 13.

Alternatively stress compensation elements can be integrated into the springs, which is shown in figures 14a and 14b. The T-form facilitates the reception of tensions in lengthwise direction, as the small T side can be bended crosswise. Advantages of this modification are the simple and proven technology, a large freedom of the design parameters and the high precision of the fabricated springs. The dry etching makes it possible to manufacture smaller dimensions of the spring and also smaller trenches. Thus the spring needs less space even with complicated embodiment and more area can be used for the electrostatic force generation. Combined with a wet etching process for the adjustment of the spring thickness, very precise spring mass systems can be produced.

The results of the transmittance measurements of the short and long cavity filters presented in figures 15 and 16 confirm the optical design to achieve a high transmittance and a low bandwidth.

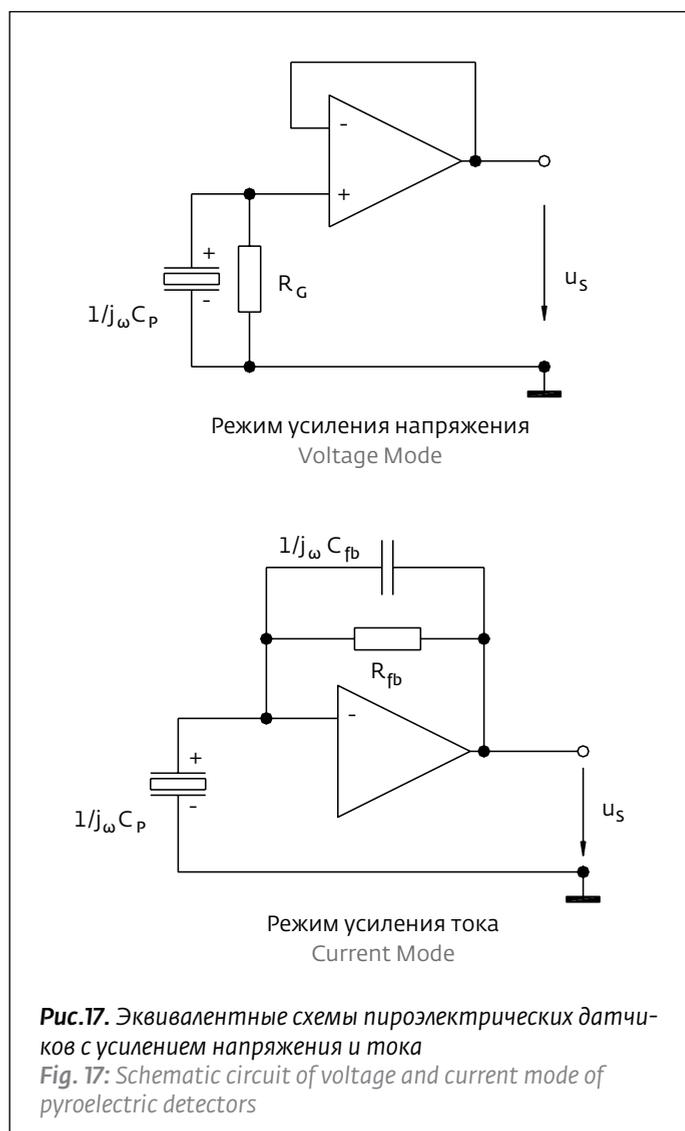
резонаторов. Таким образом получается более прямоугольная характеристика пропускания, что в свою очередь обеспечивает лучшее согласование со спектрами поглощения отдельных газов.

Многоканальные пироэлектрические датчики лучше подходят для анализа смесей из нескольких известных газов. Типичными примерами успешного применения таких датчиков являются мониторы анестетических газов и аппараты для исследования функции легких. Датчики с перестраиваемым фильтром обеспечивают более высокий уровень эксплуатационной гибкости газоанализатора и позволяют проводить анализ сложных газовых смесей со смежными

Сравнение многоканальных и перестраиваемых датчиков

Comparison of multi and tunable colour detectors

Параметры схемы Specification	Многоканальный датчик Multi colour detector	Перестраиваемый датчик Tunable colour detector
Основной элемент Principal	Делитель пучка Beam splitter	Перестраиваемый фильтр Фабри-Перо Tunable Fabry-perot Filter
Фильтрация Filtering	Одновременная Parallel	Последовательная Serial
Часть потока излучения на канал Radiation flux per channel	25 или 50% 25 or 50%	100%
Фильтр Filter	Однорезонаторный или много-резонаторный Single and multi-cavity	Однорезонаторный с регулируемым воздушным зазором Single tunable air cavity
Спектральный диапазон Spectral range	3–25 мкм / $\mu\text{m}$	4,3–3,0 / 5,0–3,7 мкм / $\mu\text{m}$
Режим с усилением тока Current mode	Да Yes	Да Yes
Режим с усилением напряжения Voltage mode	Да Yes	Да Yes
Температурная компенсация Thermal Compensation	Нет No	Да Yes



The typical bandwidths FWHM of the long cavity and short cavity filters are  $100 \pm 20$  nm and  $80 \pm 20$  nm respectively. The voltage dependence of the filter's CWL features the typical square root function of an electrostatic actuator. The decreasing transmittance during tuning is a result of the moveable reflectors tilting, which is induced from spring stiffness and electrode area inhomogeneities. The spring design with compensation elements results in maximum driving voltages 27 V to provide a tuning range of about 1300 nm.

### COMPARISON OF MULTI-COLOR AND TUNABLE COLOR DETECTORS

Both detectors can be used in current mode as well as in voltage mode. The respective circuitries are shown in fig. 17. The specific detectivity  $D^*$  of pyroelectric detectors is equal in both modes for



или перекрывающимися спектрами поглощения. При испытаниях датчиков были успешно измерены концентрации отдельных газов, таких как пары этанола и углекислого газа, и проведен анализ газовой смеси, содержащей метан, пропан и анестезирующие газы. Далее приведена сводная таблица сравнения многоканальных и перестраиваемых датчиков.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. MolExplorer 3.6, Copyright 2006 PASTECH GmbH
2. **Staab J.** Industrielle Gasanalyse. – Oldenbourg, München und Wien, 1994.
3. **Macleod H.A.** Thin-Film optical filters. – IoP, Bristol and Philadelphia, 2001.
4. **Kurth S., Hiller K., Neumann N., Heinze M., W.Dötzel, Geßner T.** A tunable Fabry-Perot-Interferometer for 3–5  $\mu\text{m}$  wavelength with bulk micromachined reflector carrier. – Proc. SPIE, 2003, v. 4983, 215–226.
5. **Neumann N., Hiller K., Kurth S.** Micromachined Mid-Infrared Tunable Fabry-Perot Filter. – Proc. 13th Int. Conf. on Solid-State Sensors, Actuators and Microsystems, 2005, 1010–1013 Seoul, Korea, June.
6. **Stockwell W.H.** Coating design using very thin high- and low-index layers. – Appl. Optics, 1985, 24 (4), 457–460.
7. **Neumann N., Ebermann M., Hiller K., Kurth S.** Tunable infrared detector with integrated micromachined Fabry-Perot filter. – Proc. SPIE, 2007, v. 6466, 646606, p. 1–12.
8. **Neumann N., Stegbauer H. – J., Sänze H., Gürtner M., Schneider F.** Application of fast response dual-colour pyroelectric detectors with integrated op amp in a low power NDIR gas monitor. – Proc. 8th Int. Conf. for Infrared Sensors and systems, 2004, IRS2, 183–188, Nuremberg, Germany, May.

identical basic conditions. Even so, the current mode has some advantages, with the result, that this is the preferred mode in tunable colour detectors. Because of the considerably lower electrical time constant the responsivity above the thermal time constant is some orders of magnitude higher. The amplitude characteristic is very flat up to the electric corner frequency, which can be in the range of 10... 1000 Hz /8/.

Multi-colour detectors separate the beam entering through the aperture stop in two or four parts, which halves or quarters the total radiation flux. However, the beam splitting and spectral filtering are carried out at the same time. For the tunable-colour detector the spectral filtering is a sequential process, where the whole radiation flux which is entering the aperture stop is available. The near band pass filters of the multi-colour detectors are also based on the design principle of a Fabry-Perot filter and use dielectric QWOT layers for reflectors and resonator-cavity. In contrast to the tunable

Fabry-Perot filter the NBP's can have multiple coupled cavities. Thus a more rectangular transmission curve is reached, which results in a higher effective transmission of the filters and a better adjustment with the gas absorption band..

The multi-colour detector should be preferably used for the analysis of gas mixtures with few, known gases. Typical examples for a successful application are anaesthetic gas monitors and the pulmonary function testing. Tunable-colour detectors allow a more flexible operation of the analyser enabling the detection of adjoining or overlapping absorption bands. So far the measurement of single gases like ethanol and carbon dioxide as well as gas mixtures of methane, propane and anaesthetic gases have been tested. In table 1 multi – and tunable-colour detectors are summarized.