

ИВАНЕНКО Александр Анатольевич

**Интерференционно-чувствительные фотоприемники и их
применения**

01.04.01 – приборы и методы экспериментальной физики

АВТОРЕФЕРАТ

диссертация на соискание ученой степени
кандидата физико-математических наук

Красноярск – 2009

Работа выполнена в Институте физики им. Л.В. Киренского Сибирского Отделения Российской Академии Наук.

Научный руководители

доктор физико-математических наук
кандидат физико-математических наук

В.Ф. Шабанов
Н.П. Шестаков

Официальные оппоненты

доктор технических наук
кандидат физико-математических наук

В.П. Кирьянов
А.В. Замков

Ведущая организация

Сибирский федеральный университет

Защита состоится « ___ » _____ 2009 года в _____ часов в конференц-зале Института физики им. Л.В. Киренского на заседании диссертационного Совета Д.003.055.01 Института физики им. Л.В. Киренского СО РАН по адресу: 660036, Красноярск, Академгородок, 50 стр. 38.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Института физики им. Л.В. Киренского СО РАН.

Автореферат разослан « ___ » _____ 2009 г.

Ученый секретарь

Диссертационного совета Д.003.055.01
д.ф.-м.н.

Втюрин А.Н.

Общая характеристика работы

Актуальность работы

Интерференционно-чувствительные фотоприемники (ИЧФ), т. е. фотоприемники, чувствительные к положению относительно интерференционных полос в поле встречных световых потоков, являются основой интерферометров, в которых регистрация осуществляется в месте противоположно-направленных световых лучей.

Впервые, наличие стоячих противоположно-направленных световых волн было зафиксировано Отто Винером (Otto Wiener) в 1890 г. с помощью зеркала и фотоэлектрической эмульсии [1]. Он исследовал слоистую структуру фотографической эмульсии, возникшую при воздействии интерференционного поля, полученного двумя световыми потоками: падающим и отраженным от зеркала. В этом эксперименте, в качестве датчика интерференционного поля, образованного встречными световыми потоками, был использован слой фотографической эмульсии.

Айвс и Фрэй в 1933 г. [2] повторили эксперимент Винера с использованием в качестве датчика интерференционного поля встречных световых потоков полупрозрачного тонкого фотоэлектрического слоя.

Датчиком распределения интерференционного поля встречных световых потоков является среда, пропускающая оптическое излучение (иначе интерференционное поле разрушается), чувствительная к интенсивности световой волны и пространственно разрешающая интерференционные полосы.

Интерферометры на встречных световых потоках, имеют более простые оптические схемы, содержат меньше элементов и, соответственно, проще юстируются. Например, устройство, с которым экспериментировал Винер, состоит всего из двух элементов - фотографической пластинки и металлического зеркала, расположенных под небольшим углом друг к другу. В экспериментах Айвса и Фрэя интерференционное поле так же создавалось с помощью одного зеркала.

Однако, фотоприемники, чувствительные к пространственному положению в интерференционном поле, образованном встречными световыми потоками, не имеют серийного применения и в настоящее время. Получили распространение интерферометры, в которых регистрируются однонаправленные световые потоки (Майкельсона, Жамена, Фабри-Перо, Рождественского, Рэля, Физо и др.) традиционными фотоприемниками. Препятствием широкого использования простых однозеркальных интерферометров является практическое отсутствие ИЧФ. Промышленный выпуск таких фотоприемников открывает возможность создания широкого спектра новых опто-электронных устройств.

Прецизионные измерения с помощью интерферометров – это основной метод прямых сверхточных измерений геометрических параметров. Мировые лидеры производят интерферометры с разрешением < 1 нм. При возросшем интересе современной науки к нано-размерным исследованиям, развитие новых принципов интерферометрии весьма актуально. Многоэлементный интерференционно-чувствительный фотоприемник с ИЧ элементами, разнесенными в

направлении световых лучей [2-6], имеет многофазные сигналы, что позволяет значительно увеличить разрешение интерферометров при измерении перемещения.

ИЧФ может быть избирательным по длине волны, без применения каких-либо элементов с селективным поглощением или отражением света [7, 8]. Это позволяет рассмотреть новые принципы создания ячейки матричного приемника цветного изображения.

ИЧФ позволяет производить электронную запись голографического изображения [9]. В перспективе ИЧСФ позволит решить задачу записи цветного голографического изображения без освещения объекта монохроматическим излучением, т. е. в белом свете. Иначе говоря, ИЧФ может стать основным элементом цветной голографической видеокамеры.

Используя мульти-плёночный ИЧФ в качестве фотоприемника в Фурье-спектрометре [2-4], можно отказаться от механического сканирования, которое осуществляется для получения необходимой разности хода световых лучей в традиционных Фурье-спектрометрах.

Цели и задачи работы

Целью настоящей работы является разработка физических основ способа регистрации интерференционных полей встречных световых потоков с помощью тонких фоточувствительных электрических слоев.

Для достижения поставленной цели решались следующие задачи:

1. Исследование влияния неоднородностей, толщины фотоэлектрического слоя на интерференционную чувствительность фотоприемника.
2. Разработка вакуумного квадратурного ИЧФ с подавлением синфазного сигнала и со свойствами избирательности по длине волны.
3. Расчет селективного фотоприемника с характеристиками селективности, эквивалентными избирательности усредненного человеческого зрения (RGB-фотоприемник).
4. Расчет характеристик селективности ИЧФ с двумя выходами полосно-пропускающего и режекторного фильтра, не содержащего элементов избирательного поглощения.
5. Разработка схемы коррелометра и автокоррелометра оптических сигналов на основе ИЧФ.

Научная новизна

1. Исследовано влияние неоднородностей, толщины фотоэлектрического слоя на интерференционную чувствительность фотоприемника.
2. Произведен расчет селективного ИЧФ с двумя выходами, имеющего характеристики селективности полосно-пропускающего и режекторного фильтра.
3. На основе моделирования расположения фотоэлектрических слоев в интерференционном поле встречных световых потоков, разработан вакуумный квадратурный ИЧФ с подавлением синфазного сигнала и свойствами избирательности по длине волны с высоким отношением сигнал/шум.

4. Показано, что ИЧФ с тремя ИЧ элементами может обладать цветовой избирательностью, приближающейся к цветовой избирательности человеческого глаза.
5. Разработан способ измерения корреляционной функции оптических сигналов без механического сканирования разности хода оптических путей.

Научная и практическая значимость

1. Разработаны ИЧФ, которые могут быть использованы для оптоэлектроники, интерферометрии, спектроскопии, электронной голографии, телекоммуникаций и других применений.
2. Предложен коррелометр оптических сигналов – основа миниатюрного Фурье-спектрометр без механического сканирования.
3. Разработан вакуумный квадратурный ИЧФ с подавлением синфазного сигнала и со свойствами избирательности по длине волны для измерения перемещений с высоким отношением сигнал/шум (более 100) с граничной частотой >3 МГц.

Основные положения, выносимые на защиту

1. Результаты расчета влияния неоднородностей, толщины фотоэлектрических слоев на интерференционную чувствительность фотоприемника.
2. Вакуумный квадратурный ИЧФ с подавлением синфазного сигнала и со свойствами избирательности по длине волны.
3. Схема и характеристики селективности интерференционно-чувствительного RGB-фотоприемника.
4. Схема и характеристики селективности ИЧФ с двумя выходами, имеющего характеристики селективности полосно-пропускающего и режекторного фильтра.
5. Схема ИЧФ-коррелометра и ИЧФ-автокоррелометра оптических сигналов без механического сканирования.

Апробация работы

Результаты, положенные в основу диссертации, опубликованы в журнале «Оптика и спектроскопия», трудах SPIE, представлены на конференциях в США (Орландо), Новосибирске, Москве, Томске, Ялте, в Сибирском Федеральном Университете. ИЧ-фотоприемник и интерферометр на встречных световых потоках демонстрировались на Международных выставках достижений РАН в Китае (г. Шеньян, 2006 г.), «Фотоника-2008» (г. Москва) и «Оптика-2008» (г. Москва).

Личный вклад автора

1. Исследование влияния неоднородностей, толщины фотоэлектрических слоев на интерференционную чувствительность фотоприемника.
2. Разработка вакуумного квадратурного ИЧФ с подавлением синфазного сигнала и со свойствами избирательности по длине волны.

3. Расчет ИЧФ с характеристиками селективности, эквивалентными избирательности усредненного человеческого зрения (RGB-фотоприемник).
4. Расчет ИЧФ с двумя выходами полосно-пропускающего и режекторного фильтра, не содержащего элементов избирательного поглощения.
5. Разработка схемы коррелометра и автокоррелометра оптических сигналов без механического сканирования на основе ИЧФ.

Публикации

В диссертационную работу включены результаты, опубликованные в 4 статьях в центральной отечественной и зарубежной печати, и 11 патентах РФ.

Структура и объем диссертации

Диссертация состоит из введения, пяти глав, заключения и списка литературы. Общий объем диссертации составляет 83 страницы, включая 39 рисунков. Библиографический список, содержит 84 наименования.

Исследования, представленные в работе, были поддержаны грантами: INTAS Collaborative Research Project with Airbus – Ref. Nr 04-80-6791; «Разработка вакуумного интерференционно-чувствительного фотоприемника» в соответствии с Генеральным соглашением №40 между Министерством науки и технологий РФ и администрацией Красноярского края «О сотрудничестве в сфере науки и технологий» от 26.04.1999 г; президента РФ в поддержку ведущих научных школ (НШ-6612.2006.3); интеграционный проект №5 СО РАН «Метаматериалы и структурно-организованные среды для оптоэлектроники и СВЧ техники и нанофотоники» (2009-2011 г.).

Содержание работы

Во введении диссертационная работа охарактеризована в целом, обоснована актуальность выбранной темы, сформулированы цели. Изложена структура диссертации, приведены основные результаты, отмечена их новизна и практическая значимость. Приводятся сведения о публикациях по теме исследований и апробации работы.

В первой главе описаны существующие технологии изготовления фотоприемников, перспективные для изготовления интерференционно-чувствительных фотоприемников.

Технологии вакуумных фотоэлектронных приборов, с использованием внешнего фотоэффекта, являются наиболее доступными для изготовления ИЧФ [10]. В большинстве вакуумных фотодиодах и фотоумножителях, фотокатод является тонким и прозрачным (за исключением приборов с массивным фотокатодом). Т. е. автоматически выполняются требования к фоточувствительным слоям в ИЧФ [11] без снижения быстродействия фотоприемника и значительного усложнения технологии изготовления.

Открытие в 1976 году [12] возможности легирования аморфного кремния (a:Si), полученного в тлеющем разряде, положило использованию его высоких фотопроводящих свойств. Принципиально тонкие фоточувствительные слои, возможность использования прозрачных, в том числе, стеклянных подложек,

низкотемпературный процесс - свойства описываемой технологии, которые делают ее весьма привлекательной для изготовления интерференционно-чувствительных фотоприемников.

В [13,14] описывается интерферометр встречных световых потоков (интерферометр стоячей волны) с применением датчика интерференционного поля стоячей волны на основе аморфного кремния гидрогенизированным водородом. Приведенные в [13] сигналы не являются пока удовлетворительными с точки зрения использования в прецизионных измерителях перемещения, но показывают перспективность данной технологии.

С использованием a-Si:H технологии сделаны измерения спектра с помощью однослойного датчика интерференционного поля встречных световых потоков [15], так же рассмотрены вопросы оптимизации квантовой эффективности, просветления и оптической толщины фотоэлектрических слоев. С помощью однозеркального интерферометра и аморфно-кремниевого ИЧФ удалось разрешить спектральные линии двулучевого лазерного излучения 545 и 633 нм [16]. При этом сканирующее перемещение зеркала составило 3.2 мкм. Разрешение по длине волны $\Delta\lambda$ описывается выражением

$$\Delta\lambda = \frac{\lambda^2}{2 \cdot \Delta l}. \quad (1)$$

По технологии «кремний на изоляторе» предпринята попытка изготовления ИЧФ [21]. Тонкий слой кристаллического кремния (60 нм) наносился непосредственно на кварцевую подложку. Электроды p⁺-n⁺-диоды располагались «встречно-штыревым» способом, образуя квадратные диоды 1×1 мм. Кварцевая подложка с обратной стороны смежного диода подтачивалась для обеспечения разной задержки измеряемого лазерного излучения, и соответственно, фазового сдвига сигналов диодов на $\pi/2$ при перемещении подложки в интерференционном поле когерентного излучения. Вместе с усилителем обеспечивалась граничная полоса пропускания – 600 кГц. Технология «кремний на сапфире» так же обладает свойствами, которые являются ключевыми для создания ИЧФ. Это, прежде всего, прозрачная подложка и тонкая пленка самих кремниевых элементов.

Высокая обнаружительная способность в важной части ИК диапазона резистивных фотоприемников на PbS, не перекрываемая другими фотоприемниками, возможность изготовления тонкопленочными и полупрозрачными на прозрачной подложке делают их привлекательными для использования в качестве интерференционно-чувствительных [11].

Во второй главе дано определение, описаны свойства интерференционно-чувствительного фотоприемника, представлены результаты расчета влияния неоднородностей, толщины фотоэлектрических слоев на интерференционную чувствительность.

Интерференционно-чувствительный фотоприемник (ИЧФ) – это фотоприемник, электрический отклик которого зависит от его положения в интерференционном поле, образованном встречными потоками излучения (рис.1),

т.е. он является детектором пространственного распределения интенсивности в интерференционном поле встречных световых потоков. Он состоит из прозрачной подложки и прозрачного тонкого фотоэлектрического слоя [4, 11].

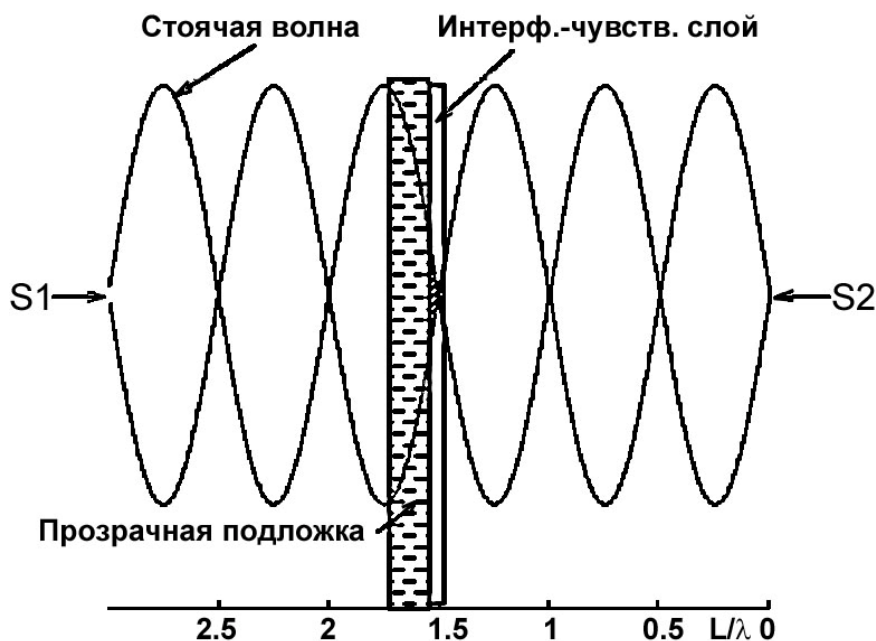


Рис. 1. ИЧ-фотоприемник в интерференционном поле встречных световых потоков. По оси абсцисс отложена оптическая разность хода, нормированная к длине волны

Высокая прозрачность ИЧФ необходима для того, чтобы в фотоэлектрическом слое не значительно уменьшался контраст интерференционного поля, образованного встречными световыми потоками. Частотный диапазон чувствительности фотоэлектрического слоя к интенсивности света бегущей волны должен соответствовать частотному диапазону излучения, образующего измеряемое интерференционное поле. Контраст интерференционного поля когерентного излучения равен 1.

Отклик фотоприемника пропорционален интегралу от интенсивности в пределах толщины фотоэлектрического слоя d_{onm}

$$Q(x_{opt}, \tau, d_{opt}) \cong \int_{x_{opt}}^{x_{opt} + d_{opt}} \cos^2 \left(\frac{2\pi}{\lambda} x + \frac{\pi c}{\lambda} \tau \right) dx \cong \frac{1}{2} \sin \left(\frac{2\pi}{\lambda} d_{opt} \right) \cos \left(\frac{4\pi}{\lambda} x_{opt} + \frac{2\pi c}{\lambda} \tau + \frac{2\pi}{\lambda} d_{opt} \right) + \frac{\pi}{\lambda} d_{opt}, \text{ где} \quad (2)$$

λ – длина волны;

c – скорость света;

t – время;

τ – исходная временная задержка фронта S2 относительно фронта S1;

Зависимость сигнала от пространственной координаты имеет вид суммы синусоидальной функции и постоянной величины. Отклик фотоприемника так же прямо пропорционален чувствительности фотоэлектрического слоя к интенсивности света бегущей волны.

Одним из параметров, характеризующим интерференционную чувствительность ИЧФ, т.е. чувствительность к положению относительно полос интерференционного поля, является максимальное приращение отклика фотоприемника за период интерференционного сигнала когерентного излучения (размах интерференционной составляющей отклика фотоприемника)

$$\Delta Q = Q_{\max} - Q_{\min}, \text{ где} \quad (3)$$

Q_{\max} , Q_{\min} – максимальное и минимальное значения отклика фотоприемника при изменении координаты x_{opt} или задержки τ в пределах интерференционного периода. Зависимость нормированного значения ΔQ от d_{opt} описывается выражением

$$\Delta Q_{norm}(d_{opt}) = \frac{\Delta Q(d_{opt})}{\Delta Q_{\max}} = \left| \sin\left(\frac{2\pi}{\lambda} d_{opt}\right) \right|, \text{ где} \quad (4)$$

ΔQ_{\max} – максимальное значение функции $\Delta Q(d_{opt})$.

Однако отклик фотоприемника пропорционален не только интерференционной составляющей интенсивности световых потоков. Он имеет составляющую, пропорциональную средней, за период интерференции, интенсивности световых потоков, что снижает динамический диапазон интерференционной чувствительности фотоприемника. Параметром, отражающим долю полезной составляющей отклика ИЧФ, является его коэффициент передачи контраста. При контрасте интерференционного поля равном 1, этот коэффициент равен

$$V = \frac{Q_{\max} - Q_{\min}}{Q_{\max} + Q_{\min}}. \quad (5)$$

Зависимость нормированного значения V от d_{opt} имеет вид

$$V_{norm}(d_{opt}) = \frac{V(d_{opt})}{V_{\max}} = \frac{\lambda \left| \sin\left(\frac{2\pi}{\lambda} d_{opt}\right) \right|}{2\pi d_{opt}}, \text{ где} \quad (6)$$

V_{\max} – максимальное значение функции $V(d_{opt})$.

Произведение $\Delta Q V$ является комплексным параметром, характеризующим эффективность ИЧФ.

Зависимость нормированного значения $\Delta Q V$ от d_{opt} имеет вид

$$\Delta Q_{norm} V_{norm}(d_{opt}) = \Delta Q_{norm}(d_{opt}) V_{norm}(d_{opt}) = \frac{\lambda \sin^2\left(\frac{2\pi}{\lambda} d_{opt}\right)}{2\pi d_{opt}}. \quad (7)$$

Графики описанных выше параметров от нормированной оптической толщины фотоэлектрического слоя d_{opt} / λ представлены на рис. 2.

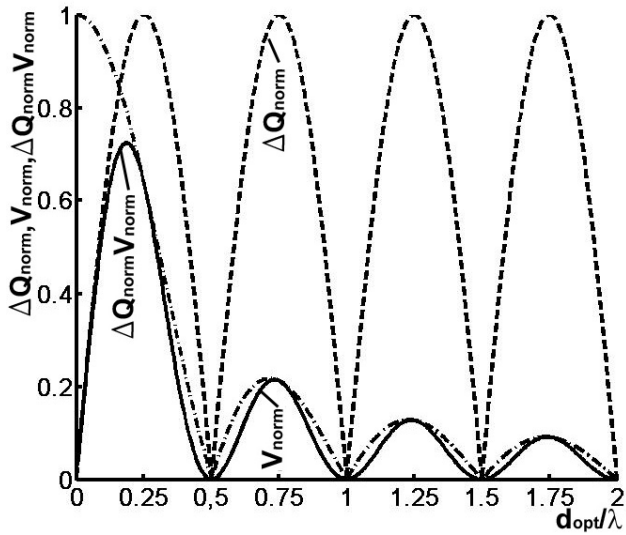


Рис. 2. Зависимость нормированных значений интерференционной составляющей сигнала фотоприемника ΔQ_{norm} от нормированного среднего абсолютного отклонения оптической толщины фотоприемника распределенного по равномерному и нормальному закону

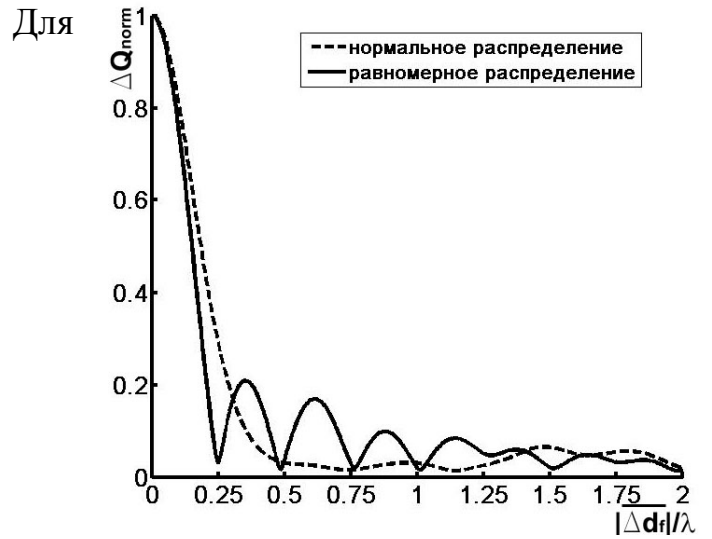


Рис. 3. Зависимости нормированных значений максимального приращения отклика фотоприемника за период интерференционного сигнала ΔQ_{norm} , коэффициента передачи контраста V_{norm} и произведения $\Delta Q_{norm} V_{norm}$ от нормированной оптической толщины фотоэлектрического слоя

обоснования требования по неоднородности оптической толщины элементов фотоприемника, рассмотрим отклик фотоприемника при отклонении оптической толщины фотоприемника $\Delta d_f(x_{opt}, y_{opt})$, которая меняется по рабочей площади S фотоприемника [4, 11]. Отклик участков фотоэлектрического слоя, в пределах которых фотоприемник имеет отклонение оптической толщины $\Delta d_f(x_{opt}, y_{opt})$ пропорционален:

$$Q(\Delta d_f(x_{opt}, y_{opt})) \cong \frac{1}{2} \sin\left(\frac{2\pi}{\lambda} d_{opt}\right) \cos\left(\frac{4\pi}{\lambda} \left(x_{opt} - \frac{\Delta d_f(\Delta d_f(x_{opt}, y_{opt}))}{2}\right) + \varphi\right) + \frac{\pi}{\lambda} d_{opt}. \quad (8)$$

Зависимость нормированного значения ΔQ от $|\Delta d_f|$ описывается выражением

$$\Delta Q_{norm}(|\Delta d_f|) = \frac{\Delta Q(|\Delta d_f|)}{\Delta Q_{max}}. \quad (9)$$

График зависимости (9) приведен на рис. 2 для равномерного и нормального законов распределения отклонения $|\Delta d_f|$.

В третьей главе описаны конструкция и принцип работы первого вакуумного (рис. 4-7) и первого резистивного (рис. 8-9) интерференционно-чувствительных фотоприемников.

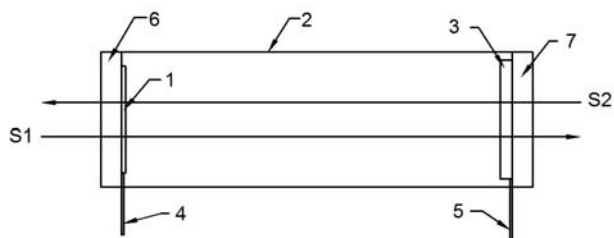


Рис. 4. Интерференционно-чувствительный вакуумный фотоэлемент: 1- прозрачный фотокатод, 2 - герметичный баллон, 3 - прозрачный анод, 4 и 5 - подводящие электроды, 6 и 7 - входное и выходное окно



Рис. 5. Фотография различных исполнений фотоприемника

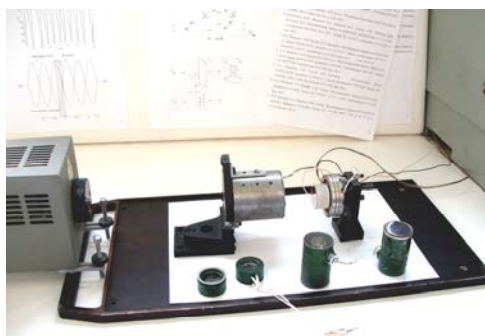


Рис. 6. Вакуумный ИЧФ в составе однозеркального интерферометра

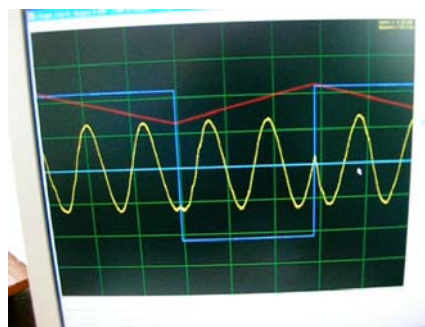


Рис. 7. Сигналы на выходе фотоэлемента (желтая линия), а так же на входе пьезоэлемента (красная линия), управляющего зеркалом



Рис. 8. Резистивный ИЧФ. 1,3 - электроды; 2- прозрачный фотоэлектрический слой; 4 – прозрачная подложка

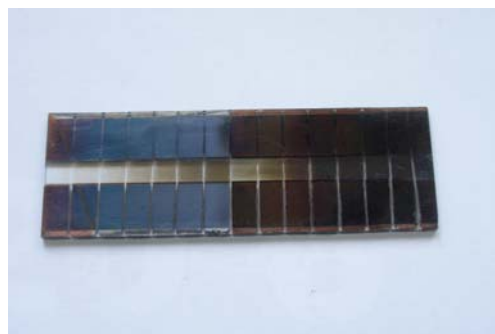


Рис. 9. Фотография одного из исполнений резистивного фотоприемника

В четвертой главе на основе моделирования расположения фотоэлектрических слоев в оптическом пространстве описано создание симметричного квадратурного ИЧФ, вакуумного квадратурного ИЧФ с подавлением синфазного сигнала и со свойствами избирательности по длине волны.

Одноэлементный ИЧФ не может быть сам по себе полноценным датчиком перемещений. Скачек фазы на π , при изменении направления движения в момент максимума синусоидального сигнала не идентифицируется. Эта неоднозначность устраняется при использовании в фотоприемнике двух или более ИЧ элементов.

Отклик фотоэлектрического слоя 1 (рис. 10) пропорционален

$$\begin{aligned} Q_1(x_{opt}, d_{onm}) &\cong \int_{x_{opt}-d_{onm}/2}^{x_{opt}+d_{onm}/2} \cos^2\left(\frac{2\pi}{\lambda} x\right) dx \cong \\ &\cong \frac{1}{2} \sin\left(\frac{2\pi}{\lambda} d_{onm}\right) \cos\left(\frac{4\pi}{\lambda} x_{opt}\right) + \frac{\pi}{\lambda} d_{onm}, \end{aligned} \quad (10)$$

а отклик фотоэлектрического слоя 2 пропорционален

$$\begin{aligned} Q_2(x_{opt}, d_{opt}) &\cong \int_{x_{opt}-d_{onm}/2}^{x_{opt}+d_{onm}/2} \cos^2\left(\frac{2\pi}{\lambda} x + (k_1 - k_3) \frac{\pi}{2} + k_2 \frac{\pi}{2} + \frac{\pi}{4}\right) dx \cong \\ &\cong \frac{1}{2} \sin\left(\frac{2\pi}{\lambda} d_{onm}\right) \cos\left(\frac{4\pi}{\lambda} x_{opt} - \frac{\pi}{2}\right) + \frac{\pi}{\lambda} d_{onm}. \end{aligned} \quad (11)$$

Таким образом, отклики фотоэлектрических слоев фотоприемника являются квадратурными, так как имеют взаимный фазовый сдвиг равный четверти периода. На рис. 11 изображен вариант исполнения симметричного квадратурного фотоприемника.

Фотоприемник обладает симметрией квадратурных свойств, т. е. при повороте на 180° , относительно его рабочего положения для любой схемы интерферометра, фазовый сдвиг его выходных сигналов остается равным $\pi/2$.

В вакуумном квадратурном ИЧФ с подавлением синфазного сигнала – четыре фотоэлектрических слоя, т.е. фотоприемник имеет четыре выходных сигнала. Рис. 12 поясняет принцип работы 4-х фазного ИЧФ, включенного по 2-х фазной схеме с подавлением аддитивных составляющих помехи [6, 18]. Противофазные сигналы с противоположных фотокатодов вычитаются с помощью масштабных усилителей. В результате, полезная интерференционная часть сигнала удваивается, а помеха (постоянная подсветка, электрическая наводка) – вычитается. На выходе масштабных усилителей имеется квадратурный сигнал, свободный от постоянной подставки и электрической наводки. Кроме того, такая схема является для интерференционного сигнала гребенчатым фильтром, настроенным на длину волны лазера [7].

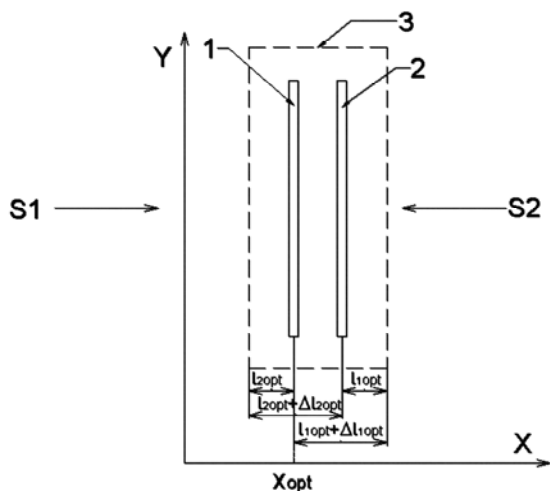


Рис. 10. Структурная схема симметричного квадратурного ИЧФ

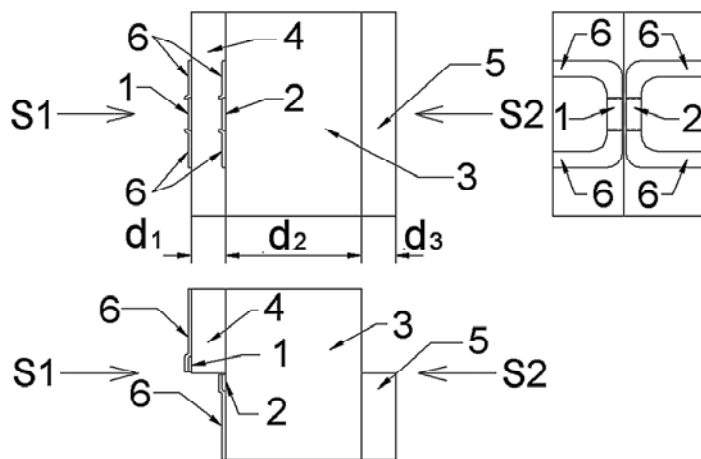


Рис. 11. Эскизный чертеж симметричного варианта исполнения квадратурного ИЧФ

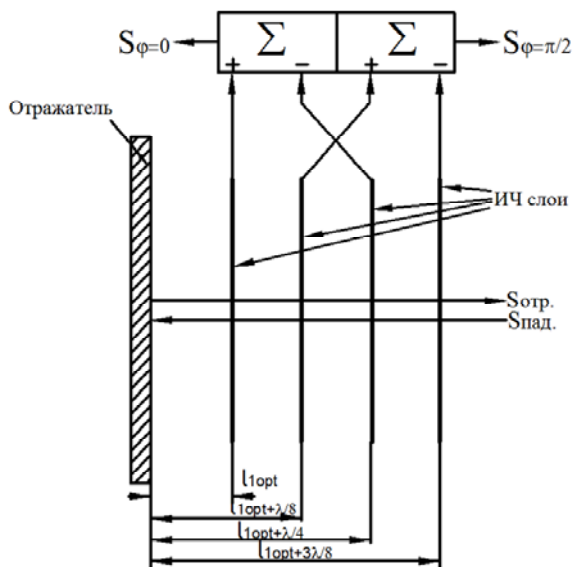


Рис 12. Включение 4-х фазного ИЧФ по 2-х фазной схеме с подавлением аддитивных составляющих помехи

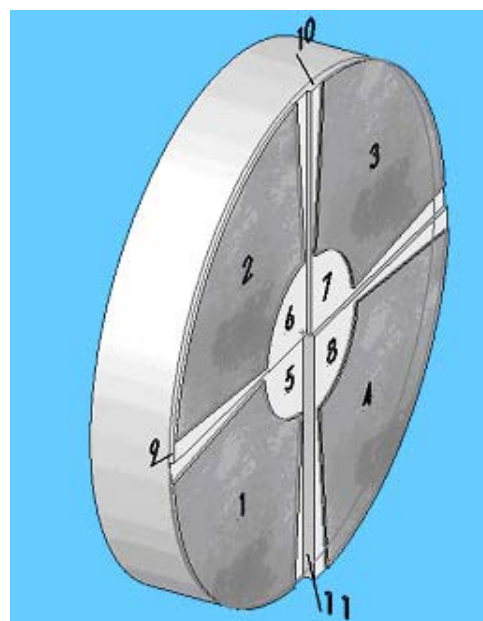


Рис 13. Катодное окно вакуумного 4-х фазного ИЧФ: 1,2,3,4 – электроды фотокатодов; 5,6,7,8 – фотокатоды; 9 – слой MgF_2 оптической толщиной $\lambda/8$; 10 – слой MgF_2 оптической толщиной $\lambda/4$; 11 – слой MgF_2 оптической толщиной $3\lambda/8$

Сигналы, на входе и на выходе масштабных усилителей представлены на рис. 14. Принципиальная схема усилителя и схема подключения к нему фото-

приемника изображена на рис. 15. Частота среза цепи «фотоприемник – усилитель» составляет 3 МГц и ограничена частотными свойствами усилителя с высоким входным сопротивлением.

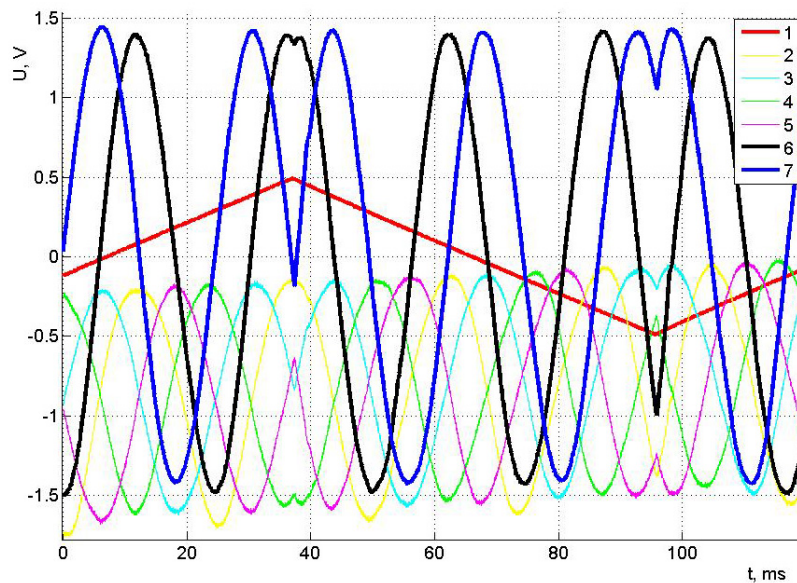


Рис. 14. Эпюры напряжений: 1 – напряжение на входе пьезоэлемента; 2,3,4,5 - сигналы на входе масштабных усилителей; 6,7 - квадратурные сигналы на выходе масштабных усилителей

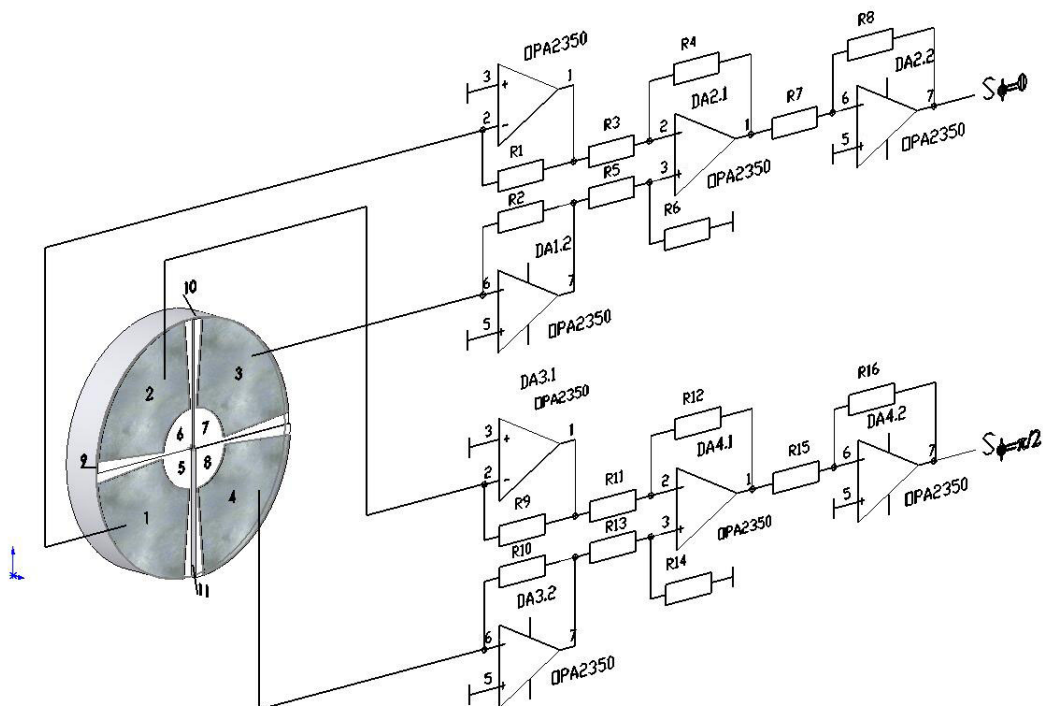


Рис 15. Принципиальная схема усилителя и схема подключения к нему фотоприемника

Глава 5 посвящена построению селективных интерференционно-чувствительных фотоприемников (ИЧСФ).

Интерференционно-чувствительный селективный фотоприемник (ИЧСФ), изображенный на рис. 16, состоит из зеркала и N интерференционно-чувствительных элементов (ИЧЭ), расположенных на заданном оптическом расстоянии от плоскости зеркала в пределах длины когерентности входного оптического излучения [8]. Выходные сигналы ИЧЭ складываются с весовыми коэффициентами a_i . Характеристика фильтра формируется выбором оптических расстояний l_i от ИЧЭ до зеркала, а так же выбором весовых коэффициентов a_i . Синтез такого фильтра, с заданными амплитудно-частотными и амплитудно-фазовыми характеристиками, можно производить по методикам синтеза цифровых фильтров, которые очень хорошо проработаны.

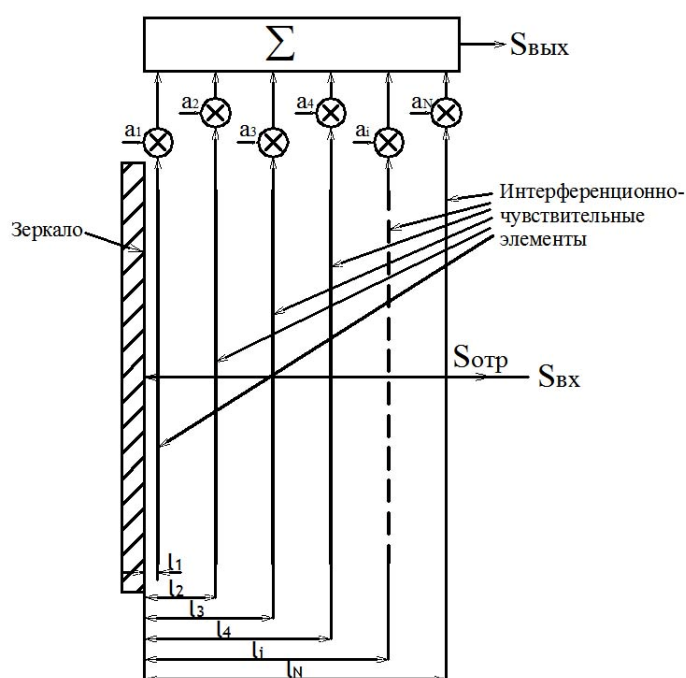


Рис. 16. Структурная схема интерференционно-чувствительного селективного фотоприемника (ИЧСФ).

На рис. 17 изображена структурная схема синтезированного ИЧСФ с выходами пропускающего и режекторного фильтра [7, 8], а на рис. 18 его расчетные характеристики.

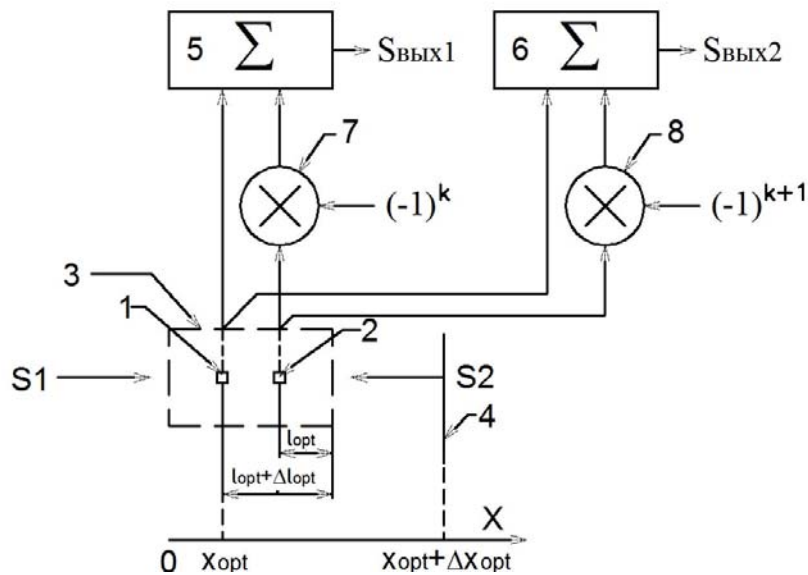


Рис. 17. Селективный фотоприемник оптических сигналов выходами пропускающего и режекторного фильтра. 1,2 – интерференционно-чувствительные слои; 3 – коррелометр; 4 – отражатель; 5,6 – сумматор; 7,8 – умножитель; $S_{\text{ВЫХ1}}$ – выход пропускающего фильтра; $S_{\text{ВЫХ2}}$ – выход режекторного фильтра; $\Delta l_{\text{opt}} = k\lambda / 4$.

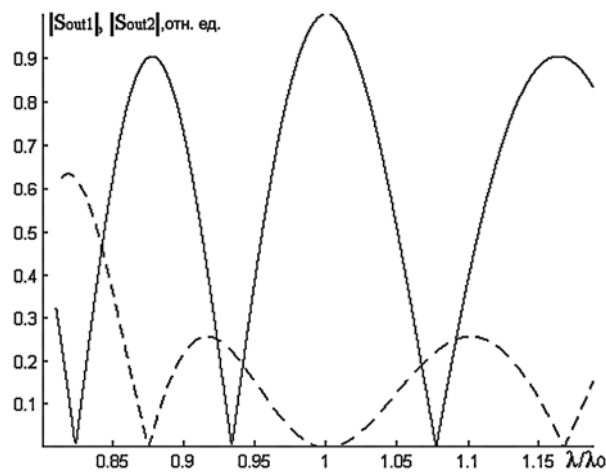


Рис. 18. Результаты расчета ИЧСФ ($\Delta l_{\text{opt}} = 2\lambda_0 / 4$, $\Delta x_{\text{opt}} = 2\lambda$). Сплошная линия – сигнал на выходе пропускающего фильтра; штриховая линия – сигнал на выходе режекторного фильтра

В главе 6 заложены основы построения ИЧСФ - коррелометра оптических сигналов без механического сканирования разности хода [3, 5].

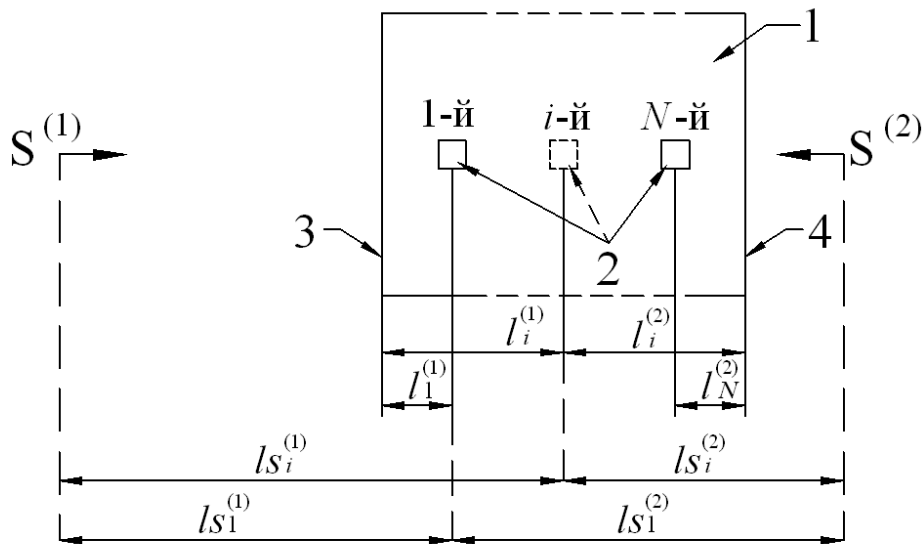


Рис. 13. Схема коррелометра оптических сигналов. $S^{(1)}$ и $S^{(2)}$ – встречные световые потоки; 1 – коррелометр; 2 – фотоэлементы, чувствительные к интерференционному полю (ИЧФ); 3,4 – внешние поверхности фотоприемника - коррелометра оптических сигналов.

$$l_i^{(1)} = (l_2^{(1)} - l_1^{(1)}) \cdot (i - 1) + l_1^{(1)}; \quad l_i^{(2)} = (l_1^{(2)} - l_2^{(2)}) \cdot (N - i) + l_N^{(2)}$$

На выходах каждого ИЧ элемента (рис. 13) формируются дискретные значения (отсчеты) корреляционной функции:

$$\begin{aligned} B(\tau_i) &= B((i - 1) \cdot \Delta\tau) = \\ &= \langle E^{(1)}(t - (i - 1) \cdot \Delta\tau^{(1)}) \cdot E^{(2)}(t + (i - 1) \cdot \Delta\tau^{(2)}) \rangle = \\ &= \langle E^{(1)}(t) \cdot E^{(2)}(t + (i - 1) \cdot \Delta\tau) \rangle, \text{ где} \end{aligned} \quad (12)$$

$\Delta\tau = \Delta\tau^{(1)} + \Delta\tau^{(2)}$ - интервал дискретизации взаимной временной задержки световых потоков $S^{(1)}$ и $S^{(2)}$.

В автокоррелометре на ИЧФ нулевая разность хода световых потоков задана жестко взаимным расположением зеркала и интерференционно-чувствительных фотоэлементов, а при использовании металлического зеркала, его пространственное расположение совпадает с нулевой разностью хода. В рассматриваемом автокоррелометре отсутствуют фазовые искажения, связанные с неточным механическим сканированием. А что касается времени сканирования, то оно в ИЧФ-автокоррелометре равно нулю из-за отсутствия самого механического сканирования – все отсчеты АКФ могут считываться одновременно. Длительность съема отдельной интерферограммы определяется лишь постоянной времени используемого ИЧФ. Т. е. спектры могут сниматься в реальном времени и с высокой виброустойчивостью.

Основные результаты и выводы работы

Настоящая диссертация посвящена разработке физических основ способа регистрации интерференционных полей встречных световых потоков с помо-

щью тонких фоточувствительных электрических слоев. В работе исследовано влияние неоднородностей, толщины фотоэлектрических слоев на интерференционную чувствительность.

На основе моделирования расположения фотоэлектрических слоев в интерференционном поле встречных световых потоков, создан селективный ИЧФ с двумя выходами, имеющий характеристики селективности полосно-пропускающего и режекторного фильтра.

Показано, что ИЧФ с тремя ИЧ элементами может обладать цветовой избирательностью, приближающейся к цветовой избирательности человеческого глаза.

Разработан способ измерения корреляционной функции оптических сигналов без механического сканирования разности оптических путей.

Создан вакуумный квадратурный ИЧФ с подавлением синфазного сигнала и свойствами избирательности по длине волны с высоким отношением сигнал/шум и граничной частотой > 3 МГц.

Основные результаты диссертации опубликованы в работах:

1. Shestakov N.P., Ivanenko A.A., Sysoev A.M. Photodetector interference field // Proceedings of SPIE, V. 4900, Part Two. – 2002. – P. 1276-1289.
2. Ivanenko A.A., Shestakov N.P., Sysoev A.M., Shabanov V.F. New photodetector - meter of the correlation function of optical signals // Proceeding SCI, V.10. – 2003. – P. 124-129.
3. Пат. 2222039 Российская федерация, МКП G03H1/04, Устройство для записи голограммы объекта во встречных пучках / Иваненко А.А., Шестаков Н.П., Сысоев А.М., Шабанов В.Ф. – № 2002104016/28; 2002.02.13; утв. 2004.01.20, Бюл. №2.
4. Пат. 2217710 Российская федерация, МКП G01J3/457, Способ измерения корреляционной функции световых потоков и устройство для его осуществления / Иваненко А.А., Шестаков Н.П., Сысоев А.М., Шабанов В.Ф. – № 2002112978/28; 2002.05.13; утв. 2003.11.27, Бюл. №33.
5. Пат. 2227341 Российская федерация, МКП H01J40/02, Фотоэлектронный прибор / Иваненко А.А., Шестаков Н.П., Сысоев А.М. – № 2002103994/09; 2002.02.13; утв. 2004.04.20, Бюл. №11.
6. Пат. 2224331 Российская федерация, МКП H01L31/00, Фотоприемник (варианты) / Шестаков Н.П., Иваненко А.А., Сысоев А.М. – № 2001131679/28; 2001.11.23; утв. 2004.02.20, Бюл. №5.
7. Пат. 2239918 Российская федерация, МКП H01L31/00, Фотоприемник / Шестаков Н.П., Иваненко А.А., Сысоев А.М. – № 2002103558/28; 2002.02.08; утв. 2004.11.10, Бюл. №31.
8. Пат. 2239917 Российская федерация, МКП 7H01L 31/00, Фотоприемник / Шестаков Н.П., Иваненко А.А., Сысоев А.М. – № 2002101414/28; 11.01.2002; утв. 10.11.2004, Бюл. №31.
9. Пат. 2243615 Российская федерация, МКП H01L 31/00, Фотоприемник / Иваненко А.А., Шестаков Н.П., Сысоев А.М. – № 2002105463/28; 2002.02.28; утв. 2004.12.27, Бюл. №36.

10. Пат. 2241280 Российская федерация, МКП H01L31/00, Фотоприемник / Шестаков Н.П., Иваненко А.А., Сысоев А.М. – № 2002102016/28; 2002.01.21; утв. 2004.11.27, Бюл. №33.
11. Ivanenko A.A., Shestakov N.P., Sysoev A.M., Shabanov V.F. Method for measuring light flux correlation function and device for carrying out said method // WO 2005/008201. – 2005. – 17 p.
12. Пат. 2255306 Российская федерация, МКП G01B9/02, Интерферометр / Иваненко А.А., Сысоев А.М., Шестаков Н.П. – № 2002107179/28; 2002.03.20; утв. 2005.06.27, Бюл. №18.
13. Иваненко А.А., Шестаков Н.П., Сысоев А.М., Шабанов В.Ф. Квадратурный двухфазный интерференционно-чувствительный фотоприемник для интерферометров встречных световых потоков // Труды Всероссийской научно-технической конференции. – Красноярск. – 2006. С. 339-343.
14. Пат. 2335034 Российская федерация, МКП H01L31/00, Квадратурное фотоприемное устройство / Иваненко А.А., Шестаков Н.П., Сысоев А.М., Шабанов В.Ф. – № 2007115748/28; 2007.04.25; утв. 2008.09.27, Бюл. №27.
15. Ivanenko A.A., Shabanov V.F., Sysoev A.M., Shestakov N.P. Interference Sensitive Selective Photodetector // Proceedings of SPIE. – 2008. – Volume 7009, 70091K. 8 pages.

Литература

1. Борн М., Вольф Э. Основы оптики. – М: Наука. – 1973. – 720 с.
2. Ives H., Fry T. Standing light waves; Repetition of an experiment by Wiener, using a photoelectric probe surface // J. of Optical Society of America, V. 23. – 1933. P. 73–83.
3. Пат. 2217710 Российская федерация, МКП G01J3/457, Способ измерения корреляционной функции световых потоков и устройство для его осуществления / Иваненко А.А., Шестаков Н.П., Сысоев А.М., Шабанов В.Ф. – № 2002112978/28; 2002.05.13; утв. 2003.11.27, Бюл. №33.
4. Ivanenko A.A., Shestakov N.P., Sysoev A.M., Shabanov V.F. New photodetector - meter of the correlation function of optical signals // Proceeding SCI, V.10. – 2003. – P. 124-129.
5. Иваненко А.А., Шестаков Н.П., Сысоев А.М., Шабанов В.Ф. Интерференционно-чувствительный фотоприемник-коррелометр оптических сигналов // Оптика и спектроскопия. – 2008. – Том 104, № 4. – С. 687–689.
6. Пат. 2335034 Российская федерация, МКП H01L31/00, Квадратурное фотоприемное устройство / Иваненко А.А., Шестаков Н.П., Сысоев А.М., Шабанов В.Ф. – № 2007115748/28; 2007.04.25; утв. 2008.09.27, Бюл. №27.
7. Пат. 2243615 Российская федерация, МКП H01L 31/00, Фотоприемник / Иваненко А.А., Шестаков Н.П., Сысоев А.М. – № 2002105463/28; 2002.02.28; утв. 2004.12.27, Бюл. №36.
8. Ivanenko A. A., Shabanov V.F., Sysoev A. M., Shestakov N. P. Selective interference sensitive photodetector. // Proceeding on CAOL/LFNM/POEO. – Yalta, Crimea, Ukraine, 12-17 September, – 2005. – P. 275-278.

9. Пат. 2222039 Российская федерация, МКП G03H1/04, Устройство для записи голограммы объекта во встречных пучках / Иваненко А.А., Шестаков Н.П., Сысоев А.М., Шабанов В.Ф. – № 2002104016/28; 2002.02.13; утв. 2004.01.20, Бюл. №2.
10. Пат. 2227341 Российская федерация, МКП H01J40/02, Фотоэлектронный прибор / Иваненко А.А., Шестаков Н.П., Сысоев А.М. – № 2002103994/09; 2002.02.13; утв. 2004.04.20, Бюл. №11.
11. Shestakov N.P., Ivanenko A.A., Sysoev A.M. Photodetector interference field // Proceedings of SPIE, V. 4900, Part Two. – 2002. – P. 1276-1289.
12. Spear W.E., Lecomber P.G. Electronic Properties of Substituted Doped Amorphous Si and Ge // Phys. Mag., V. 33. – 1976. – P. 935-949.
13. Sasaki M., Mi X., Hane K. Standing wave detection and interferometer application using a photodiode thinner than optical wavelength // Applied Physics Letters. – 1999. – P. 2008-2010.
14. Mi X., Sasaki M., Hane K. Ultra-thin film photodiodes for use in position sensors // J. Modern Optics, V. 48(1). – 2001. – P. 55-66.
15. D. Knipp, H. Stiebig, S.R. Bhalotra, H. Kung, D.A.B. Miller, Thin Film Technology based Micro-Fourier spectrometer // SPIE Photonics West, Conference on MOEMS and Miniaturized Systems III, SPIE 4983-15. – 2003. 12 p.
16. Stiebig H., Knipp D., Bhalotra S.R., Kung H.L., Miller D.A.B. Interferometric Sensors for Spectral Imaging // Sensors and Actuators A: Physical, 120/1. – 2005. – P. 110-114.
17. Li Y., Mi X., Sasaki M., Hane K. Precision optical displacement sensor based on ultra-thin film photodiode type optical interferometers // Measurement Science and Technology. – 2003. – P. 479-483.
18. Иваненко А.А., Шестаков Н.П., Сысоев А.М., Шабанов В.Ф. Квадратурный двухфазный интерференционно-чувствительный фотоприемник для интерферометров встречных световых потоков // Труды Всероссийской научно-технической конференции. – Красноярск. – 2006. С. 339-343.

Подписано в печать 22.05.2009 г.
Формат 60×84/16. Гарнитура Таймс. Уч. изд. л. 1.5
Усл. печ. л. 1.0. Тираж 70. Заказ №

Отпечатано в типографии Института физики СО РАН
660036, Красноярск, Академгородок
