

На правах рукописи

Звей Нэй Зо

**РАЗРАБОТКА И ИССЛЕДОВАНИЕ
ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЕЙ ДАВЛЕНИЯ И СИЛЫ
НА ОСНОВЕ ОПТИЧЕСКОГО ТУННЕЛЬНОГО ЭФФЕКТА**

Специальность 05.13.05

«Элементы и устройства вычислительной техники и систем управления»

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Москва – 2013

Диссертационная работа выполнена на кафедре «Системы автоматического и интеллектуального управления» Московского авиационного института (национального исследовательского университета) «МАИ».

Научный руководитель: доктор технических наук, профессор
Бусурин Владимир Игоревич

Официальные оппоненты: доктор технических наук, профессор
Мельников Валерий Ефимович
кандидат технических наук
Лизунов Александр Александрович

Ведущая организация: ОАО «Центральный научно-исследовательский
технологический институт «Техномаш»

Защита диссертации состоится «___» _____ 2013 г. в ___ час. ___ мин. на заседании диссертационного совета Д212.125.01 при Московском авиационном институте (национальном исследовательском университете) «МАИ» по адресу: 125993, г. Москва, А-80, ГСП-3, ул. Волоколамское шоссе, д. 4.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Московского авиационного института (национального исследовательского университета) «МАИ».

Отзыв на автореферат, заверенный печатью, просим отправлять по адресу: 125993, г. Москва, А-80, ГСП-3, ул. Волоколамское шоссе, д. 4. Ученый совет МАИ.

Автореферат разослан «___» _____ 2013 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета Д 212.125.01
кандидат технических наук, доцент

А. В. Корнеенкова

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА ДИССЕРТАЦИИ

Актуальность темы исследования. В последние годы наметилась тенденция развития и совершенствования оптических преобразователей. Они используются в тех случаях, когда определяющими являются малые размеры, масса и возможность работы при повышенных температурах, в условиях воздействия электромагнитных полей, а также в агрессивных и взрывоопасных средах.

В частности, такие условия являются характерными для объектов авиационной и космической техники. Например, при разработке систем управления авиационными двигателями необходимо использовать данные о давлении в различных зонах, в которых высокая температура газов исключает использование полупроводниковых устройств. В настоящее время определение давления газовой среды внутри камеры сгорания осуществляется по косвенным признакам. Для приближения преобразователя к высокотемпературной области измерения возможно построение его оптических узлов на основе кварца. Известны оптические преобразователи с отражательной мембраной и принимающими и передающими волоконными световодами, в которых внешнее механическое воздействие (давление, сила), приводит к прогибу мембраны, и отраженное мембраной оптическое излучение перераспределяется на торце принимающего волоконного световода. Но чувствительность таких оптических преобразователей невелика. Чтобы повысить чувствительность, можно использовать преобразователи на основе управляемого оптического туннельного эффекта с переменным зазором между световодом и подвижной пластиной. Для измерения давления и силы целесообразно использовать преобразователи внешних воздействий на основе оптического туннельного эффекта в системе «призма полного внутреннего отражения – пластина», выполненной из кварцевого стекла, что обеспечивает возможность работы при повышенных температурах. Вместе с тем отсутствует полное математическое описание взаимодействия оптического излучения с переменными нанозазорами в таких преобразователях, что не позволяет производить точный расчет их характеристик и параметров.

Поэтому разработка и исследование оптических преобразователей на основе оптического туннельного эффекта, способных обеспечить получение достоверной информации о механических воздействиях, и их уточненных математических моделей, является актуальной задачей.

Целью работы является улучшение характеристик преобразователей давления и силы на основе оптического туннельного эффекта в системе «призма полного внутреннего отражения – пластина», выполненных из кварцевого стекла и способных работать при повышенных температурах в составе систем автоматического управления авиационными двигателями.

Для достижения указанной цели необходимо решить следующие задачи исследования:

– разработать и исследовать уточненные математические модели преобразователей на основе оптического туннельного эффекта для измерения

давления и силы;

- исследовать влияние конструктивных параметров на характеристики преобразователей давления и силы на основе оптического туннельного эффекта;

- произвести анализ влияния внешних дестабилизирующих факторов на характеристики преобразователей на основе оптического туннельного эффекта и разработать методы их компенсации;

- исследовать возможность расширения диапазона измерения преобразователей давления и силы за счет введения обратных связей по положению воспринимающего элемента и исследовать их статические и динамические характеристики;

- провести экспериментальное исследование характеристик преобразователей на основе оптического туннельного эффекта;

- разработать методику расчета преобразователей давления и силы на основе оптического туннельного эффекта.

Научная новизна работы:

- предложены уточненные математические модели преобразователей на основе оптического туннельного эффекта, которые учитывают переменность нанозора для различных точек контакта оптического излучения с модулируемой гранью призмы, что обеспечивает уменьшение погрешности расчетов характеристик преобразователей давления и силы;

- предложена новая структура преобразователя давления и силы, которая отличается введением дополнительной обратной связи по положению воспринимающего элемента, компенсирующей влияние изменения формы мембраны, что обеспечивает расширение диапазона измерения давления и силы;

- предложено новое решение, использующие температурные изменения свойств взаимосвязанных биметаллической и кварцевой мембран преобразователя на основе оптического туннельного эффекта, что позволяет производить измерение температуры в заданном диапазоне;

- методика расчета преобразователей давления и силы с оптическим туннельным эффектом основана на обеспечении заданного диапазона чувствительности, что приводит к реализации квазилинейной функции преобразования.

Методы исследования

При разработке математических моделей преобразователей внешних воздействии на основе оптического туннельного эффекта использовались основные положения волновой и геометрической оптики, применялись методы теории упругости, прикладной механики.

При исследовании характеристик преобразователей для измерения давления, сил, электрических напряжений, температуры использовались положения теории интегрального исчисления, чувствительности, погрешностей, методы численного анализа. В экспериментальных исследованиях использовались положения теории измерений и математическая обработка полученных результатов. Исследование моделей преобразователей производилось с применением программного пакета (MathCAD).

Основные положения, выносимые на защиту:

– уточненные математические модели преобразователей на основе оптического туннельного эффекта, которые учитывают неравномерность прогиба мембраны при воздействии давления и силы и расходимость оптического излучения, что уменьшает погрешность расчетов характеристик преобразователей;

– обеспечение малой температурной погрешности за счет использования кварцевых элементов преобразователя и способы компенсации температурной погрешности;

– полезная модель преобразователя температуры на основе оптического туннельного эффекта и биметаллических воспринимающих элементов, обеспечивающих работу в заданном температурном диапазоне;

– результаты экспериментального исследования влияния электрического поля на оптическое туннелирование при использовании пьезоэлектрического элемента и структурную схему преобразователя электрических напряжений на основе оптического туннельного эффекта;

– обеспечение расширенного диапазона измерения преобразователя на основе оптического туннельного эффекта за счет введения обратной связи, компенсирующей влияние изменения формы мембраны;

– методика расчета преобразователей механических воздействий с оптическим туннельным эффектом, основанная на обеспечении заданного диапазона чувствительности.

Практическая ценность исследования

Использование полученных в работе уточненных математических моделей преобразователей на основе оптического туннельного эффекта позволяет повысить точность расчета их характеристик.

Показано, что преобразователи на основе оптического туннельного эффекта в системе «призма полного внутреннего отражения – пластина», выполненные полностью из кварцевого стекла, способны работать при повышенных температурах (до 500 °С) с малой температурной погрешностью, что позволяет их использовать в системе автоматического управления авиационными газотурбинными двигателями в различных температурных зонах.

Результаты исследования влияния механических воздействий (давления, силы) и электрического напряжения на оптическое туннелирование в системе «призма-зазор-мембрана» и предложенное техническое решение преобразователя с компенсирующей обратной связью позволяют создавать преобразователи, отличающиеся расширенным диапазоном измерения.

Разработанная методика позволяет производить расчет основных параметров преобразователей давления и силы на основе оптического туннельного эффекта с обеспечением заданного диапазона их чувствительности.

Достоверность научных положений, результатов, выводов и рекомендаций, сформулированных в диссертации, обоснована соответствием полученных результатов известным, а также проведенными экспериментальными исследованиями.

Реализация результатов работы. Результаты работы использованы в учебном процессе по дисциплине «Оптические и волоконно-оптические устройства и системы» кафедры «Системы автоматического и интеллектуального управления» МАИ. На основе результатов работы созданы 2 объекта интеллектуальной собственности, подтвержденные патентом на полезную модель и патентом на изобретение.

Апробация работы. Основные научные результаты исследований по теме диссертации докладывались на 17-ой, 18-ой и 19-ой Всероссийской межвузовской научно-технической конференции студентов и аспирантов «Микроэлектроника и информатика» (МИЭТ, 2010, 2011, 2012 г.г.); Научной сессии НИЯУ МИФИ-2011 - Научно-технической конференции-семинаре по фотонике и информационной оптике (МИФИ, 2011); Всероссийской конференции по фотонике и информационной оптике (МИФИ, 2012); XIX-ом, XX-ом и XXI-ом международном научно-техническом семинаре «Современные технологии в задачах управления, автоматизации и обработки информации» (Алушта, 2010, 2011, 2012 г.г.).

Публикации. По теме диссертации опубликовано 4 научных статьи в изданиях перечня ВАК, 10 публикаций в виде тезисов докладов на научных конференциях. Получен 1 патент РФ на изобретение, 1 патент РФ на полезную модель.

Структура и объём работы. Диссертация состоит из введения, четырех глав, заключения, списка литературы, включающего 80 наименований, и одного приложения. Работа изложена на 172 страницах текста, содержит 93 рисунка и 1 таблицу.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ ДИССЕРТАЦИОННОЙ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность темы диссертационной работы, сформулированы цель и основные задачи исследований, определены научная новизна и положения, выносимые на защиту, практическая ценность, достоверность научных положений, реализация результатов работы, даны сведения об апробации и структуре диссертационной работы.

В первой главе проведен обзор методов и средств измерения давления p и силы F при повышенных температурах. Предложено использовать преобразователи давления p и силы F на основе оптического туннельного эффекта в системе «призма полного внутреннего отражения – пластина» выполненной полностью из кварцевого стекла, что обеспечивает возможность работы при повышенных температурах.

Исследована обобщенная структура и функция преобразования преобразователей на основе оптического туннельного эффекта (ОТЭ), определяющая зависимость мощности оптического излучения $P_{\text{ФП}}$ на фотоприемнике с учетом отражательной способности границы раздела сред «призма–воздух–мембрана» от зазора d между основанием призмы и мембраной, зависящего от приложенного к пластине внешнего воздействия (давления p , силы F).

Подтверждены условия, что в первичном преобразователе показатели преломления призмы n_1 и мембраны n_3 могут быть одинаковыми и должны быть больше показателя преломления зазора n_2 , и в таком случае происходит полного внутреннего отражения (ПВО), а угол падения θ должен быть в диапазоне $\arcsin(n_2/n_1) < \theta < \pi/2$. Для эффективной модуляции величина зазора d между основанием призмы и пластиной должна быть меньше длины волны излучения λ .

Показано, что для обеспечения максимального диапазона перемещений пластины необходимо, чтобы угол падения излучения был на несколько градусов больше минимального значения θ_{\min} , определяемого как $\theta_{\min} = \arcsin(n_2/n_1)$. Для материала пластины – кварц и воздушной газовой среды между призмой и подвижной пластиной осевой угол падения излучения может быть равен $\theta \approx 47^\circ \dots 49^\circ$.

Сформулированы частные задачи исследования, которые необходимо решить для разработки преобразователей давления и силы на оптическом туннельном эффекте.

Во второй главе приведена разработка и исследования уточненных математических моделей преобразователей на основе оптического туннельного эффекта для измерения давления и силы, которые учитывают неравномерность прогиба мембраны при воздействии давления и силы и расходимость оптического излучения, что уменьшает погрешность расчетов характеристик преобразователей.

Для определения суммарной мощности оптического излучения $P_{\text{ФП}}$ произведен учет различной величины зазора для точек контакта оптического излучения с модулируемой гранью призмы (рис. 1).

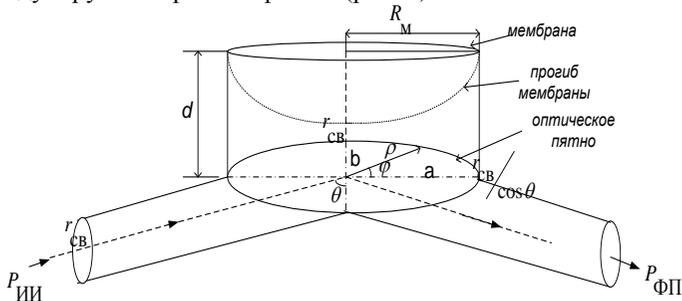


Рис.1. Общий вид места пересечения луча с гранью призмы

С учетом отражательной способности границы раздела сред «призма–воздух–подвижная пластина» от зазора d между основанием призмы и мембраной $R[d(p, F)] = f(d)$ при создании источником излучения круглого оптического пятна радиусом $r_{\text{св}}$ на перпендикулярной поверхности, зависящей от приложенного внешнего давления p или силы F , мощность оптического излучения $P_{\text{ФП}}$, достигающего фотоприемника, для точек контакта оптического излучения с модулируемой гранью призмы определяется как:

$$P_{\text{ФП}} = E_0 \cdot \cos \theta \int_0^{2\pi} \int_0^{R_{\text{ЭП}}(\phi)} R(d(r)) \cdot r \cdot dr d\phi, \quad (1)$$

ГДЕ

$$R(d(r))=0,5 \left[\frac{\exp(-\frac{4\pi}{\lambda}d(r)\sqrt{n_1^2\sin^2\theta-n_2^2})+\exp(\frac{4\pi}{\lambda}d(r)\sqrt{n_1^2\sin^2\theta-n_2^2})+2\cos(\phi_{12\perp}-\phi_{23\perp})}{\exp(-\frac{4\pi}{\lambda}d(r)\sqrt{n_1^2\sin^2\theta-n_2^2})+\exp(\frac{4\pi}{\lambda}d(r)\sqrt{n_1^2\sin^2\theta-n_2^2})+2\cos(\phi_{12\perp}+\phi_{23\perp})} \right];$$

$$+ \frac{\exp(-\frac{4\pi}{\lambda}d(r)\sqrt{n_1^2\sin^2\theta-n_2^2})+\exp(\frac{4\pi}{\lambda}d(r)\sqrt{n_1^2\sin^2\theta-n_2^2})+2\cos(\phi_{12\parallel}-\phi_{23\parallel})}{\exp(-\frac{4\pi}{\lambda}d(r)\sqrt{n_1^2\sin^2\theta-n_2^2})+\exp(\frac{4\pi}{\lambda}d(r)\sqrt{n_1^2\sin^2\theta-n_2^2})+2\cos(\phi_{12\parallel}+\phi_{23\parallel})}$$

$$\phi_{12\perp}=\arctg \left[\frac{2n_1\cos\theta\sqrt{n_1^2\sin^2\theta-n_2^2}}{n_2^2\cos^2\theta-n_1^2\sin^2\theta+n_2^2} \right]; \quad \phi_{23\perp}=180^\circ+\arctg \left[\frac{2n_1\cos\theta\sqrt{n_1^2\sin^2\theta-n_2^2}}{n_2^2\cos^2\theta-n_1^2\sin^2\theta+n_2^2} \right];$$

$$\phi_{12\parallel}=\arctg \left[\frac{2n_1\cos\theta\sqrt{n_1^2\sin^2\theta-n_2^2}}{n_2^2\cos^2\theta-\left(\frac{n_1}{n_2}\right)^2(n_1^2\sin^2\theta-n_2^2)} \right]; \quad \phi_{23\parallel}=180^\circ+\arctg \left[\frac{2n_1\cos\theta\sqrt{n_1^2\sin^2\theta-n_2^2}}{n_2^2\cos^2\theta-\left(\frac{n_1}{n_2}\right)^2(n_1^2\sin^2\theta-n_2^2)} \right];$$

$R(d(r))$ - отражательная способность, зависящая от зазора $d(r)$, $d(r)=d_0-w(p, F, r)$, d_0 - начальный зазор, $w(p)$ - прогиб мембраны от приложенного давления p или силы F ;

$$w(p)=\frac{3\cdot p\cdot(1-\mu^2)}{16\cdot E\cdot h_M^3}\cdot(R_M^2-r^2)^2; \quad w(F)=\frac{r^3\cdot F\cdot 12\cdot(1-\mu^2)}{8\pi\cdot E\cdot h_M^3}\cdot\ln\frac{r}{R_M}+\frac{F\cdot 12\cdot(1-\mu^2)}{16\pi\cdot E\cdot h_M^3}\cdot(R_M^2-r^2)$$

R_M - радиус мембраны, h_M - толщина мембраны, r - текущий радиус, E - модуль упругости материала, μ - коэффициент Пуассона, $\rho_{эл}(\varphi)$ - граница эллиптической области $\rho_{эл}(\varphi)=a\cdot b\cdot\sqrt{(b^2\cdot\cos^2\varphi+a^2\cdot\sin^2\varphi)}$, φ - полярные угол координат эллиптической области, a, b - полуоси эллипса ($b=r_{св}$, $a=r_{св}/\cos\theta$), E_0 - освещенность условной перпендикулярной поверхности [$E_0=P_{ИИ}/\pi\cdot r_{св}^2$], $P_{ИИ}$ - оптическая мощность источника излучения,

Получены зависимости мощности отраженного излучения $P_{ФП}$ от измеряемого давления p при переменных углах падения излучения θ при использовании параметров: $h_M=0,5\text{мм}$, $R_M=1,5\text{мм}$ (рис. 2, а) и от измеряемой силы F при: $h_M=0,43\text{мм}$, $R_M=5\text{мм}$ (рис. 2, б). При этом конструктивные параметры мембраны (h_M, R_M) выбраны с учетом начального зазора и прогиба мембраны около одного микрометра под действием давления и силы.

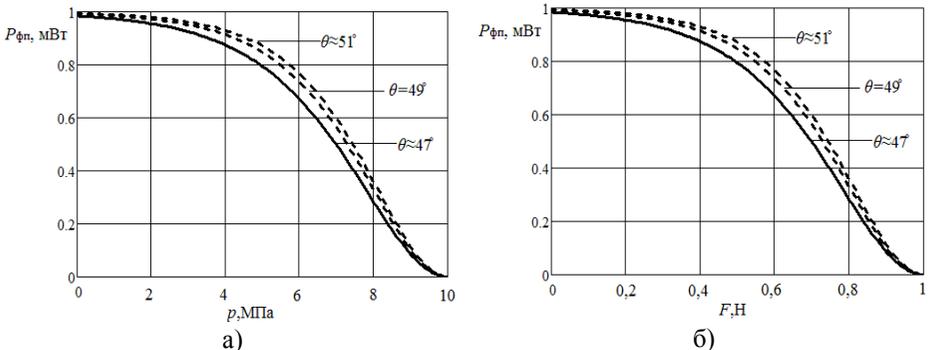


Рис. 2. Зависимость мощности оптического излучения $P_{ФП}$ при вибрации угла падения излучения θ , $P_{ИИ}=1\text{мВт}$, $r_{св}=0,2\text{мм}$, $d_0=1\text{мкм}$, $n_1=1,54$ (кварц), $n_2=1$ (воздух), $\lambda=1,3\text{мкм}$: а) от давления p ; б) от силы F

Определено, что при выбранных конструктивных параметрах диапазон измеряемых давлений составляет до 10МПа, а измеряемых сил до 1Н.

Определено, что в первичном преобразователе с одинаковыми показателями преломления n_1 и n_3 больше показателя преломление n_2 и углом падения θ между $\arcsin(n_2/n_1)$ и $\pi/2$ чувствительность к перемещению пластины в диапазоне меньше длины волны излучения λ увеличивается с увеличением угла θ падения оптического излучения. При уменьшении длины волны λ оптического излучения чувствительность первичного преобразователя к перемещению пластины увеличивается, что следует учитывать при выборе источника излучения.

При исследовании влияния переменности прогиба мембраны под воздействием давления и силы на функцию преобразования преобразователей давления p и силы F на основе оптического туннельного эффекта определена погрешность расчетов мощности оптического излучения $P_{\text{ФП уточн}}$ с учетом предложенной уточненной математической модели по сравнению с приближенной моделью для мощности оптического излучения $P_{\text{ФП прибр}}$ при разных параметрах преобразователя R_M , h_M , d и $r_{\text{св}}$. Показано, что при больших диапазонах измеряемых давлений и сил погрешность заметно увеличивается, и необходимо использовать уточненную математическую модель. Уменьшение толщины мембраны h_M и начального зазора d_0 , увеличение радиуса мембраны R_M приводит к уменьшению диапазона измерения и к увеличению погрешности расчетов, проводимых по приближенной модели $P_{\text{ФП прибр}}$ по сравнению с уточненной $P_{\text{ФП уточн}}$.

Определено, что величина радиуса $r_{\text{св}}$ круглого оптического пятна сильно влияет при моделировании на характеристики оптических преобразователей давления и силы. Показано, что погрешность расчетов функции преобразования значительно уменьшается при использовании уточненной математической модели (рис. 3).

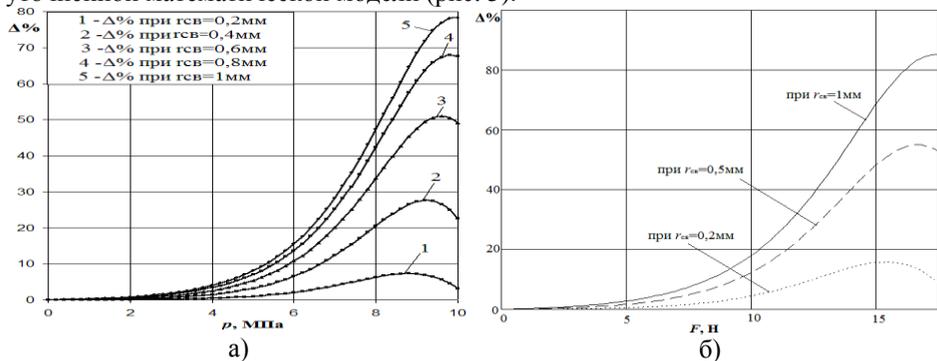


Рис.3. Зависимость погрешности расчетов для $P_{\text{ФП уточн}}$ по сравнению с $P_{\text{ФП прибр}}$ при $r_{\text{св}}=var$, $h_M=0,5\text{мм}$, $R_M=1,5\text{мм}$: а) от давления; б) от силы

При расчете величины погрешности между $P_{\text{ФП уточн}}$ и $P_{\text{ФП прибр}}$ определено, что только на начальном участке диапазона измеряемых давлений и сил возможно использование как уточненной, так и приближенной моделей.

В третьей главе проведен анализ влияния дестабилизирующих факторов на характеристики преобразователей на основе оптического туннельного эффекта, включающих влияние изготовления конструктивных параметров и влияние температуры, и разработка методов их компенсации.

Исследовано влияние погрешностей изготовления конструктивных параметров на характеристики преобразователей давления и силы, происходящих из-за изменений начального зазора d_0 , угла падения θ , радиуса R_M и толщины мембраны h_M . Уменьшение угла падения излучения и изменения зазора, вызванные увеличением толщины мембраны, приведет к незначительному уменьшению погрешности преобразователей.

При влиянии температуры величина зазора d между призмой и мембраной не только зависит от прогиба мембраны под действием давления и силы, но также зависит от температурного расширения пленки, обеспечивающей начальный зазор d_0 . Для случая малых перемещений прогиб мембраны w в свою очередь зависит от конструктивных параметров (радиуса мембраны R_M , текущего радиуса r и толщины мембраны h_M). Однако деформация мембраны также зависит от воздействия температуры, которая влияет на модуль упругости материала $E(T)$ и коэффициент Пуассона $\mu(T)$. В таком случае зазор d между призмой и мембраной определится как:

$$d(p, F, T) = d_0 + \Delta d(T) - w(p, F, T), \quad (2)$$

где $\Delta d(T) = TKE(T-T_0)d_0$ - температурное изменение расстояния между призмой и мембраной, TKE - температурный коэффициент линейного расширения материала; T - температура окружающей среды.

Получено, что при увеличении температуры, прогиб мембраны уменьшается, а начальный зазор d_0 между призмой и мембраной увеличивается, т. е. приводит к увеличению величины изменения зазора d (рис. 4).

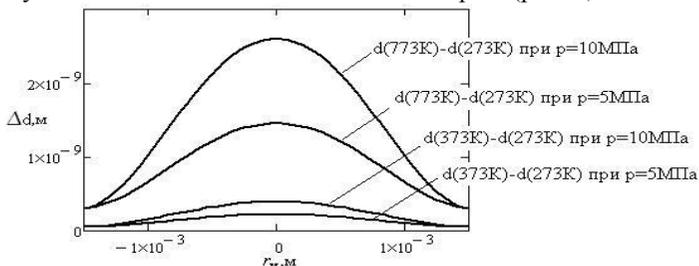


Рис.4. Абсолютная погрешность величины зазора при вариациях давления и температуры

Следует, что мощность оптического излучения $P_{ФП}$ несколько увеличивается при увеличении температуры, т.е. приводит к появлению температурной погрешности преобразователя давления. Причем, некоторому значению мощности $P_{ФП}$ соответствует набор давлений p или силы F и температур T . Поэтому для определения давления p или силы F в заданной точке необходимо знать, при какой температуре T производилось измерение давления p или силы F . Для этого необходимо дополнительно измерять температуру и передавать данные о температуре на блок обработки. Данные о зависимости

выходной мощности от давления p или силы F в определенных температурных диапазонах ΔT_i могут быть записаны в запоминающем устройстве. Выходной код давления p или силы F , измеряемого преобразователем, определяет набор ячеек, а адрес конкретной ячейки выбирается по результатам измерения температуры T преобразователем температуры и сопоставлению с температурным диапазоном ΔT_i . В результате получим информацию об измеряемом давлении p или силе F с учетом определенной температуры T окружающей среды.

При использовании верхнего закрепления мембраны и дополнительной прокладки с температурным коэффициентом линейного расширения $TKE \approx 1,2 \cdot 10^{-6} \text{ K}^{-1}$ температурная погрешность мощности оптического излучения $P_{\text{ФП}}$ составит 0,2% в диапазоне $p=0..10\text{МПа}$ и $T=273...773\text{К}$, т.е. дополнительная температурная погрешность уменьшится более чем в 2 раза. При этом зазор между призмой и мембраной будет равен:

$$d(p, F, T) = d_0 + \Delta d_{\text{кварц}}(T) - \Delta d_{\text{Д.П.}}(T) - w(p, F, T), \quad (3)$$

где $\Delta d_{\text{Д.П.}}(T)$ – температурное линейное расширение дополнительной прокладки.

При исследовании температурного изменения свойств взаимосвязанных биметаллической и кварцевой мембран с системой «призма-зазор-мембраны» предложено новое решение для построения преобразователя температуры, основанного на принципе ОТЭ, что позволяет производить измерение температуры в заданном диапазоне. Преобразователь температуры на основе ОТЭ (рис. 5) содержит источник оптического излучения 1, первичный преобразователь (ПП) 3, включающий призму полного внутреннего отражения 7, отражательную мембрану 9 и прокладку 8, расположенную между ними, приемник оптического излучения, а также световоды 2 и 4, соединяющие источник и приемник оптического излучения 5, преобразующий оптическое излучение в электрический сигнал, блок обработки информации 6, преобразующий электрический сигнал приемника оптического излучения в измеренное значение температуры. На внешней поверхности мембраны установлена пластина из биметаллического сплава 10.

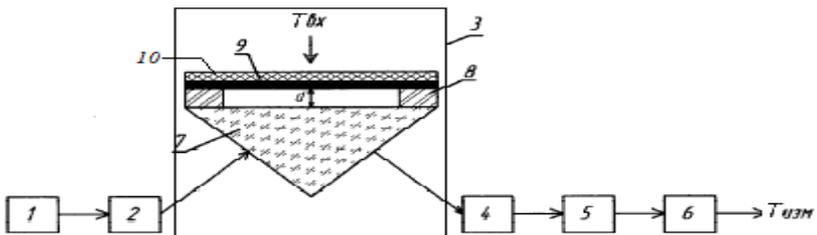


Рис.5. Структурная схема преобразователя температуры на основе ОТЭ с биметаллическим воспринимающим элементом

В таком преобразователе зазор d между призмой и мембранами – биметаллической и кварцевой определится как:

$$d(T) = d_0 - x_{\text{F}(T)}, \quad (4)$$

где $x_{\text{F}(T)}$ – прогиб центра мембраны.

При наличии двух мембран – биметаллической и кварцевой – одинакового радиуса с одновременным воздействием температуры T и противодействующей силы F прогиб центра мембраны определится как:

$$x_{F(T)} = \frac{TKЕ \cdot (T - T_0) \cdot 2,4(h^2 \cdot E_{\text{бим}}) \cdot R_M^2 \cdot (1 - \mu^2)}{E_M \cdot 16\pi \cdot h_M^3}, \quad (5)$$

где $h_{\text{бим}}$ – толщина биметаллической мембраны, $E_{\text{бим}}$ – модуль упругости биметаллической мембраны.

Следовательно, отражательная способность преобразователя, зависящая от зазора $d(T)$, является функцией конструктивных параметров и температуры: $R_T = f(T, n_1, n_2, n_3, \lambda, \theta, d_0)$. В результате получим мощность оптического излучения $P_{\text{ФПТ}}$ преобразователя на основе оптического туннельного эффекта, достигающего фотоприемника, которая является функцией температуры $P_{\text{ФПТ}} = f(T)$.

В четвертой главе предложена структура и исследованы характеристики преобразователя на основе оптического туннельного эффекта, обеспечивающего расширение диапазона измерения давления и силы за счет введения обратной связи по положению воспринимающего элемента, компенсирующей влияние изменения формы мембраны, и предложена методика расчета преобразователей давления и силы.

В преобразователе давления на основе оптического туннельного эффекта с расширенным диапазоном измерения предлагается соединение воспринимающей мембраны с дополнительной прокладкой, представляющей собой пьезокерамический актюатор, на который подается напряжение по цепи обратной связи (ОС) (рис. 6). Выходное напряжение $U_{\text{вых}}$, поступаая по каналу ОС на пьезоактюатор, за счет обратного пьезоэлектрического эффекта изменяет линейный размер пьезоактюатора, что приводит к изменению зазора d в зоне контакта оптического излучения со структурой «призма-воздушный зазор-мембрана». В результате отражательная способность $R[d(U_{\text{вых}})]$ структуры «призма-воздушный зазор-мембрана» становится функцией выходного напряжения. В случае отрицательной ОС, действие цепи ОС приводит к расширению диапазона измерения давления. Изменение параметров цепи ОС позволяет настраивать диапазон измерения преобразователя давления на основе ОТЭ.

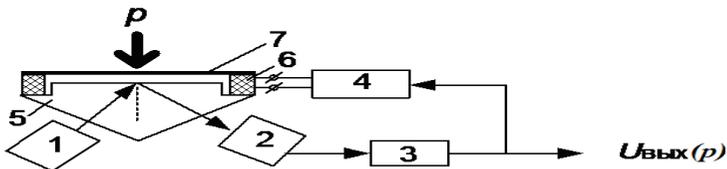


Рис.6. Преобразователь давления на основе ОТЭ с расширением диапазоном измерения: 1- источник излучения, 2 - фотоприемник, 3 – преобразователь «ток-напряжение», 4- усилитель напряжения, 5 - призма полного внутреннего отражения, 6 - пьезоактюатор, 7 - мембрана

Величина зазора структуры «призма-воздушный зазор-мембрана» такого преобразователя определяется начальным зазором d_0 , прогибом мембраны под воздействием давления $w_M(p)$ и изменением зазора за счет действия цепи ОС $\Delta d_0(U_{\text{вых}})$:

$$d(p, U_{\text{вых}}) = d_0 - w_M(p) + \Delta d_0(U_{\text{вых}}). \quad (6)$$

Зависимость выходного напряжения преобразователя $U_{\text{вых}}$ от давления с учетом суммарных потерь k_{Π} может быть представлена следующим образом:

$$U_{\text{вых}}(p) = [I_T + S_{\text{ФП}} \cdot P_{\text{ИИ}} \cdot k_{\Pi} \cdot (R[d(p, U_{\text{вых}})])] \cdot R_{\text{I-U}}, \quad (7)$$

где $R[d(p, U_{\text{вых}})]$ – отражательная способность структуры «призма-воздушный зазор-мембрана», зависящая от зазора d , $R_{\text{I-U}}$ – резистор преобразователя «ток-напряжение».

Структурная схема преобразователя давления на основе ОТЭ с ОС включает в себя (рис. 7): ЧЭ – чувствительный элемент преобразователя – мембрана, преобразующая давление p в перемещение d_p ; ПЭ – пьезоэлектрический элемент (пьезоактюатор), преобразующий напряжение, поступающее по цепи ОС в перемещение d_U ; $M(R)$ – структура «призма-воздушный зазор-мембрана», преобразующая мощность оптического излучения $P_{\text{ИИ}}$ в мощность излучения, регистрируемую фотоприемником (фотодиодом) $P_{\text{ФП}}$, с учетом отражательной способности R , которая зависит от величины зазора d_{pU} ; $I-U$ – преобразователь «ток-напряжение», преобразующий ток фотодиода $I_{\text{ФД}}$ в выходное напряжение $U_{\text{вых}}$; $УС_{U(ОС)}$ – усилитель напряжения обратной связи.

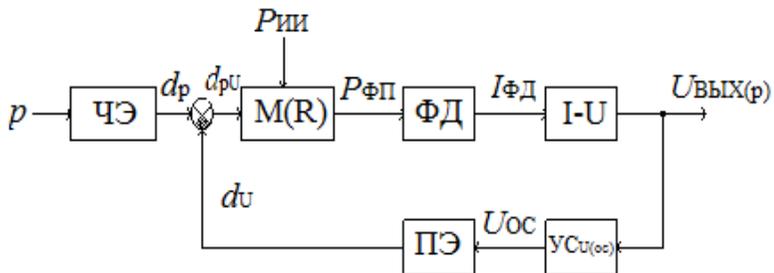


Рис.7. Структурная схема преобразователя давления с обратной связью

Результаты моделирования функции преобразования преобразователя давления на основе ОТЭ с отрицательной ОС приведены на рисунке 8 для следующих значений параметров функциональных звеньев: $P_{\text{ИИ}}=10\text{мВт}$; $d_0=0,35\text{мм}$; $k_{\text{ФД}}=0,4 \text{ А/Вт}$; $k_{\text{УСУ}}=R_2/R_1$; $k_M(p) = S_{\text{моду},i} = 0,5 \cdot (\Delta R_{\perp} + \Delta R_{\parallel}) / \Delta d_i$; $k_{\text{I-U}}=1\text{кОм}$. Из графиков видно, что введение отрицательной ОС и увеличение коэффициента усиления $k_{\text{УСУ}}$ в цепи ОС приводит к расширению диапазона измерения давления. Используя пьезоактюатор с большим коэффициентом преобразования $k_{\text{пьезо}}$, можно добиться увеличения диапазона измерения давления более, чем в 10, по сравнению с преобразователем без ОС.

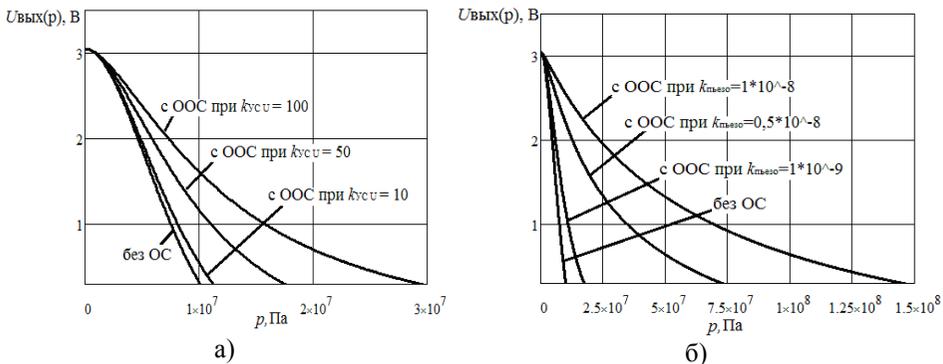


Рис.8. Зависимость выходного напряжения преобразователя давления на основе ОТЭ с ОС: а) при $k_{\text{пьезо}}=1 \cdot 10^{-9}$ м/В и $k_{\text{ycv}}=\text{var}$; б) при $k_{\text{ycv}}=50$ и $k_{\text{пьезо}}=\text{var}$

Проведено теоретическое и экспериментальное исследование кварцевого преобразователя на основе ОТЭ с плоскопараллельным зазором, управляемым с помощью электрического напряжения, и экспериментально определены величины управляющих электрических напряжений, прикладываемых к кольцевой пьезоэлектрической прокладке, для управления оптическим лучом в системе «призма полного внутреннего отражения - пластина».

Для экспериментальной проверки функции преобразования величины зазора в изменение оптической мощности при нарушении полного внутреннего отражения была использован преобразователь, в котором вместо гибкой мембраны использовалась плоскопараллельная пластина (диск), также изготовленная из плавленого кварца (рис. 9). Для регулирования зазора в качестве одного из элементов конструкции применялся пьезопакет. Коллимирующие устройства, в которых применялись градиентные линзы, устанавливались перпендикулярно катетным граням призмы. Для экспериментального исследования в качестве источника оптической мощности использовался модуль, работающий в режиме генерации излучения с длиной волны 1.31 мкм. Значение оптической мощности на входе преобразователя составило 1.7 мВт. Электрическое напряжение поступало на преобразователь от блока питания БП-10 и контролировалось вольтметром В7-27.

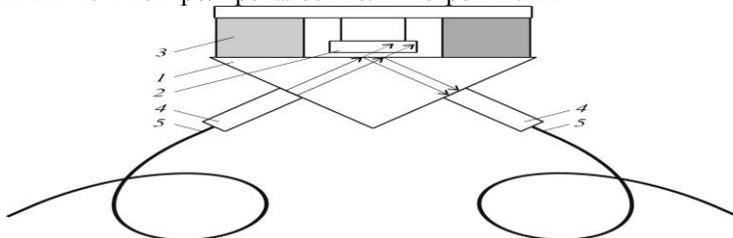


Рис.9. Преобразователь электрического напряжения на основе ОТЭ: 1- призма полного внутреннего отражения, 2- подвижный диск, 3- пьезопакет, 4- коллимирующее устройство, 5- волоконный световод

В первичном преобразователе электрического напряжения величина зазора d определяется толщиной пьезопакета, которая зависит от электрического напряжения U , подаваемого на пьезопакет. В случае монотонного изменения напряжения U , подаваемого на пьезопакет, зависимость величины зазора от напряжения можно задать кусочно-линейной функцией:

$$d = \begin{cases} \alpha(U - U_0) & \text{при } U > U_0 \\ 0 & \text{при } U < U_0 \end{cases}, \quad (8)$$

где α - чувствительность пьезопакета, U_0 - напряжение, которому соответствует нулевая величина зазора.

В таком случае с учетом отражательной способности преобразователя, зависящая от изменения зазора $d(\alpha(U-U_0))$, функция преобразования преобразователя электрического напряжения, определяемая как зависимость мощности выходного оптического излучения $P_{\text{ФП}}$ от электрического напряжения, с учетом суммарных потерь $k_{\text{П}}$ может быть представлена следующим образом:

$$P_{\text{ФП}}(U) = \begin{cases} P_0 \cdot k_{\text{П}} \cdot R[\alpha(U - U_0)] & \text{при } U > U_0 \\ 0 & \text{при } U < U_0 \end{cases}, \quad (9)$$

где P_0 – оптическая мощность, поступающая на вход преобразователя.

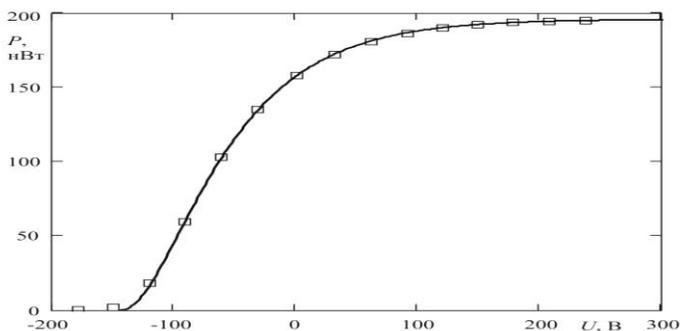


Рис.10. Функция преобразования ПП электрического напряжения (квадратные маркеры – эксперимент, сплошная линия – расчетная кривая)

Предложена методика определения конструктивных параметров преобразователей основана на обеспечении работы в заданном диапазоне чувствительности и обеспечивает реализацию требуемого диапазона измерения давления и силы. При этом для получения функции преобразования на квазилинейном участке необходимо выбрать диапазон изменения зазора с помощью отклонения толщины и радиуса мембраны от номинальных значений.

Функция преобразования преобразователя давления на основе оптического туннельного эффекта (рис. 11) с учетом уточненной математической модели для определения мощности оптического излучения $P_{\text{ФП}}$ может быть представлена в виде:

$$U_{\text{ВЫХ}}(p) = \left(E_0 \cdot \cos \theta \int_0^{2\pi} \int_0^{\rho_{\text{ЭД}}(\varphi)} R(d(r)) \cdot r \cdot dr d\varphi \right) \cdot S_{\text{ФД}} \cdot K_{\text{I-U}} \cdot K_{\text{БО}}, \quad (10)$$

где $S_{\text{ФД}}$ – чувствительность фотоприемника, А/Вт;
 $K_{\text{I-U}}$ – коэффициент преобразователя ток-напряжение;
 $K_{\text{БО}}$ – коэффициент преобразования блока обработки.



Рис.11. Структурная схема преобразователя давления на основе ОТЭ

Для определения диапазона изменения зазора d предлагается производить анализ изменения чувствительности преобразователя:

$$S(d) = \frac{R(d(r) + \Delta d) - R(d(r))}{\Delta d(r)}, \quad (11)$$

и определять участок, на котором чувствительность уменьшается не более, чем в n раз от максимального значения, т.е. до $S=S_{\text{макс}}/n$, например, в 2 раза (рис. 12).

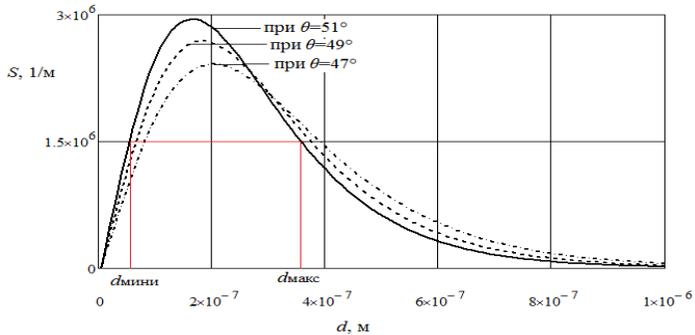


Рис.12. Чувствительность отражательной способности R сред к зазору при $\theta = \text{var}$ и $\lambda = 1,3 \mu\text{км}$

С учетом обеспечения заданного диапазона перемещений мембраны выбираются параметры мембраны (например, $R_M=1,5\text{мм}$ и $h_M=0,745\text{мм}$), и определяются зависимости выходной мощности оптического излучения $P_{\text{ФП}}$ и выходного напряжения $U_{\text{ВЫХ}(p)}$ от давления при условии $S=S_{\text{макс}}/2$, при воздействии $p=0 \dots 10\text{МПа}$, $\theta=51^\circ$, $\lambda=1,3\mu\text{км}$, $P_{\text{ИИ}}=10\text{Вт}$, $S_{\text{ФД}}=0,4\text{А/Вт}$, $R_{\text{ОС}}=1\text{кОм}$ и $d=0,05\mu\text{км} \div 0,35\mu\text{км}$ (рис. 13). При этом преобразователь «ток-напряжение» реализован на операционном усилителе (ОУ) ($K_{\text{I-U}} = U_{\text{I-U}} / I_{\text{ФД}} = R_{\text{ОС}}$, где $R_{\text{ОС}}$ – резистор в цепи по обратной связи ОУ); блок обработки обеспечивает нормирование выходного сигнала.

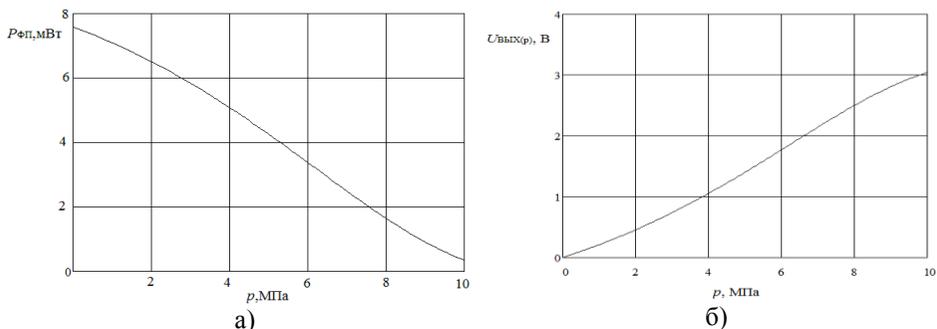


Рис.13. Зависимость мощности оптического излучения $P_{ФП}$ (а) и выходного напряжения $U_{ВЫХ(p)}$ (б) от давления $p=0\dots 10$ МПа

ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ ДИССЕРТАЦИИ

В результате выполнения данной диссертационной работы получены следующие основные научные результаты.

1. Разработаны уточненные математические модели преобразователей на основе оптического туннельного эффекта для измерения давления и силы, которые учитывают переменность наноззора для различных точек контакта оптического излучения с модулируемой гранью призмы, обеспечивающие уменьшение погрешности расчетов характеристик преобразователей давления и силы.

2. Исследовано влияние конструктивных параметров на характеристики преобразователей давления и силы на основе оптического туннельного эффекта и определены погрешности расчетов мощности оптического излучения $P_{ФП}$ $_{уточн}$ с учетом предложенной уточненной математической модели по сравнению с приближенной моделью для мощности оптического излучения $P_{ФП}$ $_{прибл}$, определяющей приближенно по центральному лучу источника излучения с учетом допущения постоянства зазора.

3. Исследовано влияние температуры на характеристики преобразователей на основе оптического туннельного эффекта и определены величины дополнительной температурной погрешности, которая уменьшена за счет использования кварцевых элементов преобразователя, и предложены способы компенсации дополнительной температурной погрешности.

4. Предложена полезная модель преобразователя температуры на основе оптического туннельного эффекта и биметаллических воспринимающих элементов, обеспечивающего работу в заданном температурном диапазоне при исследовании взаимодействия биметаллических воспринимающих элементов с системой «призма-зазор-мембрана».

5. Экспериментально исследовано влияние электрического поля на оптическое туннелирование при использовании пьезоэлектрического элемента и

предложена структурная схема преобразователя электрических напряжений на основе оптического туннельного эффекта.

6. Разработана структурная схема преобразователя, обеспечивающего расширение диапазона измерения давления и силы за счет введения обратной связи по положению воспринимающего элемента, компенсирующей влияния изменение формы мембраны.

7. Предложена методика расчета конструктивных параметров преобразователей на основе оптического туннельного эффекта, основанная на работе в заданном диапазоне чувствительности, которая обеспечивает реализацию требуемого диапазона измерения давления и силы.

СПИСОК РАБОТ, ОПУБЛИКОВАННЫХ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

Статьи, опубликованные в периодических изданиях, рекомендованных ВАК:

1. Бусурин В. И., Шток К. В., Звей Нэй Зо. Преобразователи давления и силы на основе оптического туннельного эффекта // Приборы. 2010. № 2. с. 1–5.

2. Бусурин В.И., Казарьян А.В., Чижов В.С., Звей Нэй Зо. Исследование характеристик преобразователей электрического напряжения и температуры на основе оптического туннелирования // Мехатроника, Автоматизация, Управление. 2011. № 12. с. 40–44.

3. Бусурин В.И., Звей Нэй Зо. Моделирование и компенсация температурной погрешности преобразователя давления на основе оптического туннелирования // Вестник МАИ, 2012, № 1, с. 149–156.

4. Бусурин В.И., Казарьян А.В., Жеглов М.А., Звей Нэй Зо. Моделирование преобразователя давления на основе оптического туннельного эффекта с настраиваемым диапазоном измерения // Вестник МАИ, 2012. № 4, с. 128–133.

Другие публикации автора:

5. Звей Нэй Зо. Моделирование преобразователя давления на основе оптического туннельного эффекта // 17-я Всероссийская межвузовская научно-техническая конференция студентов и аспирантов «Микроэлектроника и информатика – 2010», 28 - 30 апреля 2010 г. Тезисы докладов. – М.: МИЭТ, 2010. – с. 116.

6. Бусурин В.И., Гуськова Е.А., Звей Нэй Зо. Компенсация температурной погрешности преобразователя давления на основе оптического туннелирования // 18-я Всероссийская межвузовская научно-техническая конференция студентов и аспирантов «Микроэлектроника и информатика – 2011». 19 - 21 апреля 2011 г. Тезисы докладов. – М.: МИЭТ, 2011. – с. 102.

7. Бусурин В.И., Звей Нэй Зо, Нгуен Зуи Динь. Анализ характеристик преобразователя давления на основе оптического туннельного эффекта с расширенным диапазоном // 19-я Всероссийская межвузовская научно-техническая конференция студентов и аспирантов «Микроэлектроника и информатика – 2012». 18 - 20 апреля 2012 г. Тезисы докладов. – М.: МИЭТ, 2012. – с. 94.

8. Бусурин В.И., Звей Нэй Зо, Огурцова А.А. Компенсация температурной погрешности преобразователя давления на основе оптического туннелирования // Научная сессия НИЯУ МИФИ-2011. Научно-техническая конференция-семинар по фотонике и информационной оптике. 26-28 января 2011 г. Тезисы докладов. - М.: НИЯУ МИФИ, 2011– с. 32–33.

9. Бусурин В.И., Звей Нэй Зо, Дворникова О.Д., Мищенко О.А. Исследование математической модели преобразователя давления на основе оптического туннельного эффекта // Всероссийская конференция по фотонике и информационной оптике. 25 января – 27 января 2012 г. Тезисы докладов. М.: НИЯУ МИФИ, 2012– с. 134-135.

10. Бусурин В.И., Звей Нэй Зо. Преобразователь внешних воздействий на основе оптического туннельного эффекта //Труды XIX-ого международного научно-технического семинара «Современные технологии в задачах управления, автоматике и обработки информации», г. Алушта, 18-24 сентября 2010 г. – с. 223-224.

11. Бусурин В.И., Звей Нэй Зо. Преобразователь температуры на основе оптического туннелирования //Труды XX-ого международного научно-технического семинара «Современные технологии в задачах управления, автоматике и обработки информации», г. Алушта, 18-24 сентября 2011 г. Изд-во Пензенского ГУ, 2011. – с. 235-236.

12. Бусурин В.И., Казарьян А.В., Звей Нэй Зо. Преобразователь электрического напряжения на основе оптического туннелирования //Труды XXI-ого международного научно-технического семинара «Современные технологии в задачах управления, автоматике и обработки информации», г. Алушта, 18-24 сентября 2012 г. – М.: Изд-во ГУП Академиздат центр “Наука” РАН, 2012. – с. 145.

13. Бусурин В.И., Шток К.В., Звей Нэй Зо, Гладышев А.И. Моделирование информационных преобразователей на основе оптического туннельного эффекта // Всероссийская конференция «Проведение научных исследований в области обработки, хранения, передачи и защиты информации», 1-5 декабря 2009 г., Ульяновск, УлГТУ, 2009. - т. 2, с. 509-513.

14. Бусурин В.И., Звей Нэй Зо. Моделирование процесса излучения в преобразователе давления на основе оптического туннельного эффекта // Высокие технологии, исследования, промышленность: Сборник трудов Девятой международной конференции « Исследование, разработка и применение высоких технологий в промышленности», 22-23.04.2010, Санкт-Петербург, Россия, 2010. - т. 3, с. 233-235.

Патенты:

15. Патент на полезную модель №111643 «Преобразователь температуры на основе оптического туннельного эффекта» от 20 декабря 2011 г., Б.И. №35. (Бусурин В.И., Жеглов М.А., Звей Нэй Зо, Казарьян А.В.).

16. Патент на изобретение №2456563 «Волоконно-оптический преобразователь давления с динамически настраиваемым диапазоном» от 20 июля 2012, Б.И. №20. (Бусурин В.И., Жеглов М.А., Коробков В.В., Звей Нэй Зо).

Подписано в печать _____ . Формат 60x84
Тираж 100 экз.

Отпечатано в московском авиационном институте
(национальном исследовательском университете)
г. Москва, А-80, ГСП-3, Волоколамское шоссе, д.4.
<http://www.mai.ru/>