

К. ф.-м. н. В. А. ВАСИЛЬЕВ

Россия, Пензенский государственный университет
E-mail: paspen@rambler.ru

Дата поступления в редакцию
04.06 2002 г.

Оппонент к. т. н. Е. В. БОНДАРЕНКО
(НИИ "Шторм", г. Одесса)

МЕТОДЫ УМЕНЬШЕНИЯ ТЕМПЕРАТУРНОЙ ПОГРЕШНОСТИ ДАТЧИКОВ ДАВЛЕНИЯ

Классифицированы и рассмотрены методы уменьшения температурной погрешности, приведены примеры реализации методов в конструкциях датчиков давления.

Прямым назначением датчиков давления является регистрация измеряемой величины. Однако в большинстве случаев, наряду с полезным информативным сигналом измеряемой величины, на чувствительный элемент датчика (первичного преобразователя) действует неинформативный сигнал (сигнал помехи). Выделение полезного информативного сигнала не всегда бывает простой задачей, и решать ее приходится различными путями [1,2].

К числу наиболее часто встречающихся факторов, вызывающих появление неинформативного сигнала, относится температура. Целью настоящей статьи является получение рекомендаций по рациональному проектированию датчиков давления с учетом анализа их температурных погрешностей.

Различают квазистатическое и динамическое воздействие температуры [1]. Динамическое воздействие чаще всего оказывается со стороны измеряемой среды. Со стороны окружающей среды обычно имеет место квазистатическое воздействие температуры (медленно меняющееся со временем). Величиной, характеризующей влияние температуры на выходной сигнал первичных преобразователей, служит температурная погрешность.

Температурные погрешности датчиков давления обусловлены многими физическими процессами, протекающими в них при тепловом воздействии. Наиболее общими причинами возникновения температурных погрешностей являются изменение сопротивления, изменение коэффициента чувствительности, изменение модуля упругости, изменение линейных размеров [2]. Однако в каждом отдельном случае необходимо анализировать все виды причин. Например, при разработке датчиков давления для двигателей внутреннего сгорания и баллистических установок нельзя оставлять без внимания такие явления как температурная деформация и появление градиента температуры, которые могут служить причиной возникновения значительной температурной погрешности.

В последние десятилетия для точных измерений давлений достаточно широкое применение получили

тензорезисторные преобразователи на основе металлопленочных тензорезисторов, что позволило создать новый класс датчиков – металлопленочные интегральные датчики. Однако существующие металлопленочные датчики давления обладают рядом недостатков, которые сдерживают их применение в мощных энергетических установках. К таким недостаткам следует отнести высокую температурную погрешность при работе в условиях действия нестационарных температур (термоудара), значительную температурную погрешность нуля и чувствительности.

Можно выделить три основных группы методов уменьшения температурной погрешности — конструктивную, схемную и конструктивно-схемную.

Конструктивные методы. Одной из существенных причин возникновения температурной погрешности первичных преобразователей, построенных на основе металлопленочных тензорезисторов, является наличие градиента температуры в элементах конструкции датчика. Особенно сильное действие градиента температуры проявляется в выходном сигнале датчика из-за воздействия на его чувствительный элемент.

Эффективным методом уменьшения температурных погрешностей, обусловленных градиентом температуры, является создание равенства усредненных температур для чувствительных элементов первичных преобразователей. Данный метод применен в датчике для измерения давления [3], конструкция которого представлена на **рис. 1**. Датчик содержит мембрану с тензорезисторами, сформированными по металлопленочной технологии (см. рис. 1, а) и объединенными в мостовую измерительную цепь (рис. 1, б).

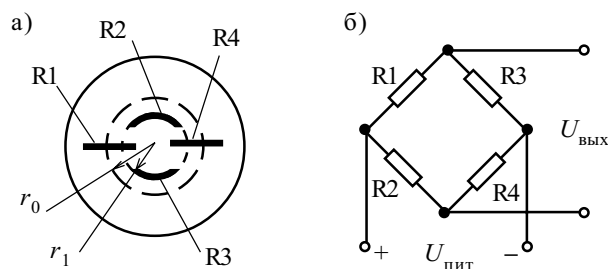


Рис. 1. Датчик измерения давления с равной усредненной температурой чувствительных элементов:
а — расположение тензорезисторов на мембране; б — мостовая измерительная цепь

Снижение влияния термоудара на выходной сигнал датчика достигается путем определенного размещения тензорезисторов на мембране. Тензорезисторы R2 и R3, расположенные в окружном направлении, установлены по окружности, радиус которой равен

$$r = r_0 - \frac{1}{3}l_{\text{ТР}}, \quad (1)$$

где r_0 — расстояние от центра мембраны до середины радиальных тензорезисторов R1 и R4;

$l_{\text{ТР}}$ — длина радиального тензорезистора.

При действии термоудара, например, температуры $T = -196^\circ\text{C}$ (жидкий азот) температура на поверхности воспринимающей мембраны распределяется неравномерно, как показано на рис. 2 (экспериментальные данные, r_m — текущий радиус мембраны). Из рисунка видно, что значение температуры, соответствующее среднему значению температуры краев радиальных тензорезисторов R1 и R4, находится на расстоянии r от центра мембраны и соответствует выражению (1). Изменение сопротивлений тензорезисторов R2 и R3 (окружных) под действием термоудара равно изменению сопротивлений тензорезисторов R1 и R4 (радиальных). А поскольку тензорезисторы R1, R2, R3 и R4 образуют плечи моста, то сигнал на выходе измерительной цепи не изменяется при воздействии термоудара. Температурная погрешность становится практически равной нулю.

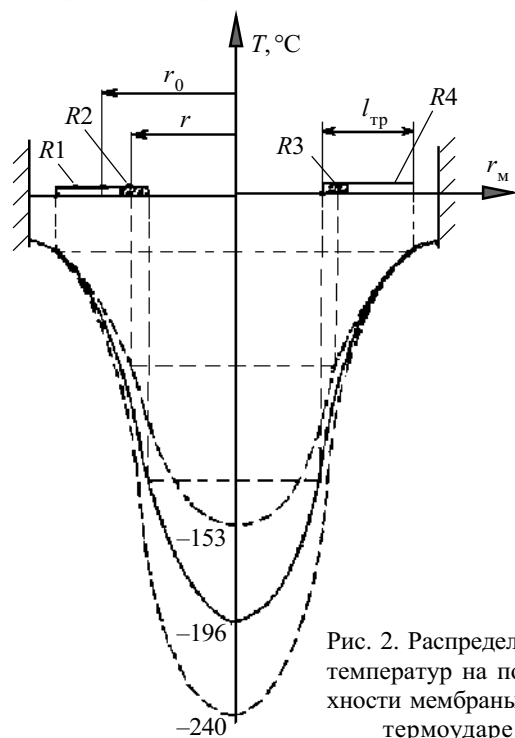


Рис. 2. Распределение температур на поверхности мембраны при термоударе

Аддитивная температурная чувствительность датчика давления, характеризующая температурную погрешность, определяется выражением

$$S_{0T} = \frac{(\alpha_1 + \alpha_4) - (\alpha_2 + \alpha_3)}{\sum_{i=1}^4 \varepsilon_{Ri}}, \quad (2)$$

где $\alpha_1, \dots, \alpha_4$ — температурные коэффициенты сопротивления тензорезисторов R1, R2, R3, R4 (соответственно) с учетом температурного поля;

$\sum_{i=1}^4 \varepsilon_{Ri}$ — относительное изменение сопротивления всех плеч мостовой цепи от номинального давления.

Для рассмотренной конструкции датчика давления $\alpha_1 = \alpha_2 = \alpha_3 = \alpha_4$, поэтому из выражения (2) следует, что $S_{0T} = 0$.

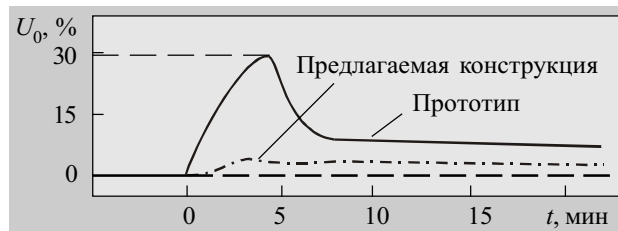


Рис. 3. Изменение начального выходного сигнала датчика давления со временем в сравнении с прототипом

На рис. 3 представлены графики изменения начального выходного сигнала датчика давления в сравнении с прототипом при воздействии на приемную полость жидкого азота (термоудар). Из рисунка видно, что скачкообразное изменение начального выходного сигнала (а следовательно, и величина погрешности) в предлагаемой конструкции практически отсутствует, а температурная погрешность не превышает погрешности в стационарном температурном режиме. Метод создания равенства усредненных температур применен в различных конструкциях датчиков давления [4 и др.].

Схемные методы уменьшения температурных погрешностей датчиков достаточно хорошо описаны в [5, с. 48—68].

В качестве примера схемного решения задачи восстановления информации о давлении и уменьшения температурной погрешности на рис. 4 представлен датчик давления, входящий в устройство [6]. В нем чувствительные к деформации металлопленочные тензорезисторы сформированы на плоской грани стержневого упругого элемента 2. Тензорезисторы 1 и 6 испытывают продольную, а тензорезисторы 4 и 7 — поперечную деформации.

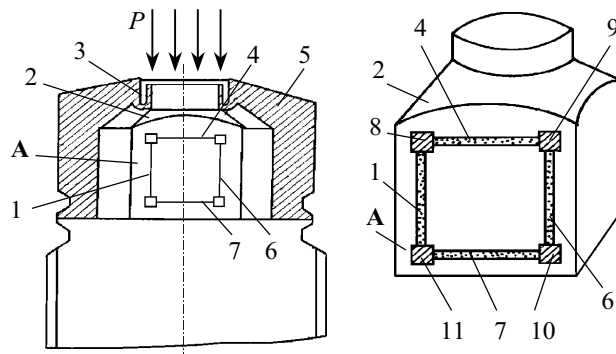


Рис. 4. Датчик давления со стержневым упругим элементом:

1, 4, 6, 7 — металлопленочные тензорезисторы; 2 — стержневой упругий элемент; 3 — мембрана; 5 — корпус датчика; 8—11 — контактные площадки

При подаче измеряемого давления (P) со стороны мембраны 3 (рис. 4) на выходе мостовой измерительной цепи из тензорезисторов 1, 4, 6, 7 появляется сигнал, пропорциональный измеряемому давлению. Этот сигнал (см. рис. 5) усиливается усилителем 12 и подается через регулирующий элемент (регулятор напряжения) 13 на выход устройства.

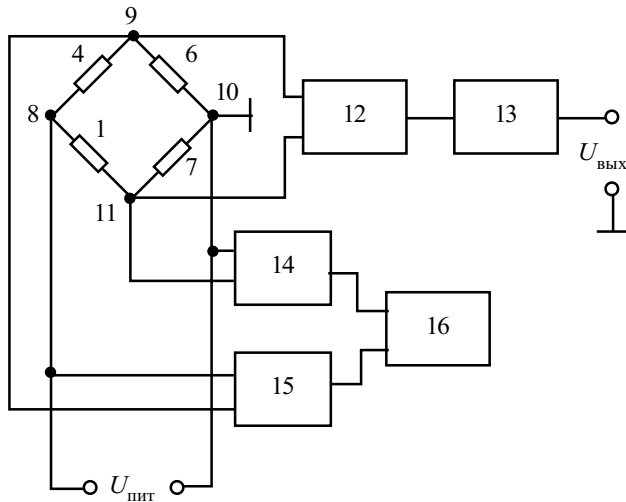


Рис. 5. Измерительная схема устройства для измерения давления: 12, 14, 15 — усилители; 13 — регулятор напряжения; 16 — сумматор

При воздействии на датчик нестационарных температур, когда имеет место градиент температуры по длине стержневого упругого элемента, тензорезисторы 4 и 7 оказываются в неодинаковых температурных условиях. В результате на выходе усилителей 14 и 15 сигналы оказываются неравными по величине, и с выхода сумматора 16 разностный сигнал, отличный от нуля, поступает на вход управления регулятора напряжения 13. Регулятор напряжения, управляемый поступающим на вход управления сигналом, обеспечивает восстановление информативного сигнала на выходе мостовой измерительной цепи, уменьшая температурную погрешность.

Конструктивно-схемные методы. В целях уменьшения температурных погрешностей датчиков давления эти методы представляют несомненный интерес.

Метод по принципу дополтельности реализован в устройстве для измерения давления [7], конструкция датчика которого представлена на рис. 6. За счет изготовленных в корпусе датчика 1 двух продольных полусферических пазов 8, выполненных с торцевой стороны, образованы каналы для охлаждающей жидкости, и мембрана охлаждается со стороны ее основания. Вместе с тем металлопленочные тензорезисторы, образующие мостовую измерительную цепь, расположены на мембране определенным образом. В частности (см. рис. 7), тензорезисторы 13 и 14 своей срединной частью размещены на двух окружностях с радиусами $r_1 = r_0 + \frac{1}{4}l_{тр}$ и $r_2 = r_0 - \frac{1}{4}l_{тр}$, соответственно. При таком расположении тензорези-

сторов происходит компенсация температурной погрешности, вызываемой наличием градиента температуры по поверхности мембраны.

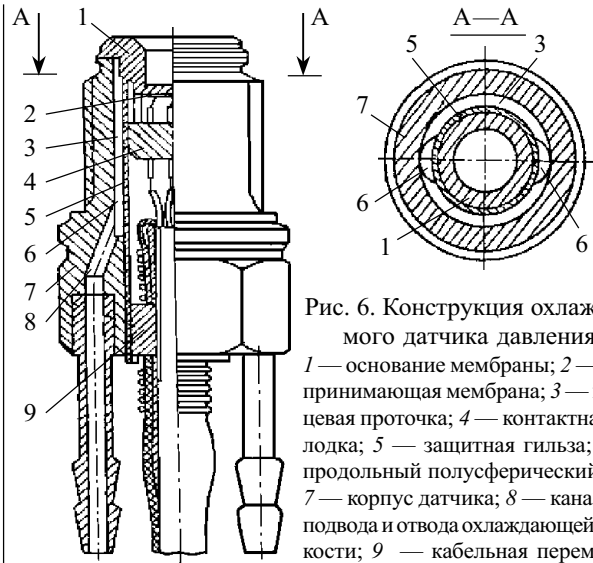


Рис. 6. Конструкция охлаждаемого датчика давления:

1 — основание мембраны; 2 — воспринимающая мембрана; 3 — кольцевая проточка; 4 — контактная колодка; 5 — защитная гильза; 6 — продольный полусферический паз; 7 — корпус датчика; 8 — канал для подвода и отвода охлаждающей жидкости; 9 — кабельная перемычка

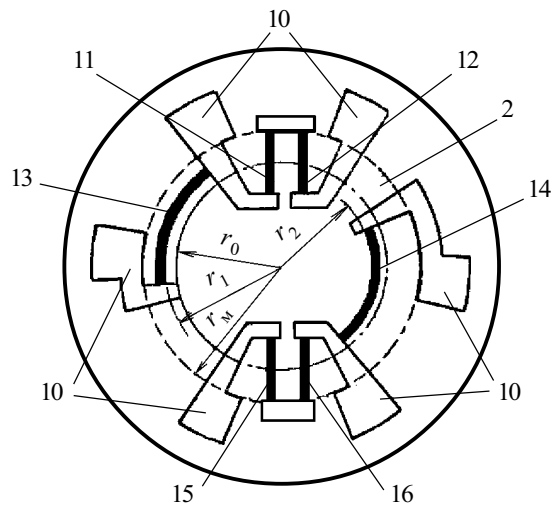


Рис. 7. Расположение тензорезисторов на мембране: 11, 12, 15, 16 — радиальные тензорезисторы; 13, 14 — окружные тензорезисторы; 10 — контактные площадки

сторов происходит компенсация температурной погрешности, вызываемой наличием градиента температуры по поверхности мембраны.

При работе датчика в условиях воздействия стационарных и нестационарных температур на выходе мостовой измерительной цепи из тензорезисторов 11—16 (см. рис. 8) будет возникать температурная погрешность, обусловленная изменением чувствительности. Однако на выходе устройства эта погрешность значительно снижена. Выходной сигнал с мостовой измерительной цепи U , содержащий составляющую температурной погрешности $\Delta U(t)$, усиливается усилителем 18 в K раз. Одновременно с полезным сигналом усиливается и составляющая температурной погрешности $\Delta U(t)$. Далее усиленный сигнал делится на напряжение U_0 в точке соединения мостовой измерительной цепи с постоянным резистором 17, который подключен к стабилизатору напряжения 19. Напряжение в этой точке пропорционально изменению чувствительности моста.

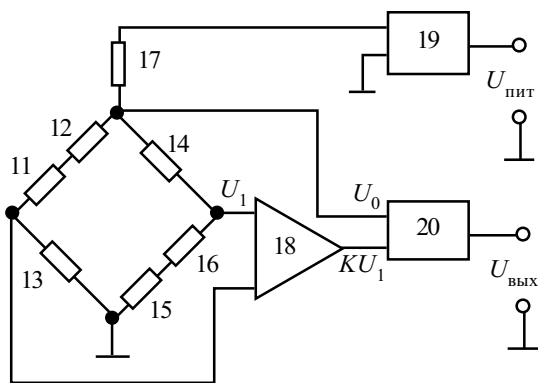


Рис. 8. Измерительная схема устройства для измерения давления:

17 — постоянный резистор; 18 — усилитель; 19 — стабилизатор напряжения; 20 — аналоговый делитель напряжения

Расчеты показывают, что

$$U_{\text{вых}} = \frac{[1 + \varepsilon_1(t)] KU_1}{[1 + \varepsilon_0(t)] U_0} \quad (3)$$

Из (3) видно, что относительные изменения напряжений выходного сигнала $\varepsilon_1(t)$ и напряжения в точке соединения постоянного резистора с мостовой измерительной цепью $\varepsilon_0(t)$ обратно пропорциональны, т. е. включен механизм компенсации для восстановления информации о давлении.

Особенностью рассмотренного метода является то, что конструктивные решения дополняются схемными решениями, за счет чего достигается больший положительный эффект.

Метод по принципу единого целого реализован в устройстве для измерения давления [8], где с целью уменьшения температурной погрешности на мембране сформированы терморезистивный мост и тензорезистивный мост, имеющие одинаковую топологию и размещенные друг над другом. Оба моста подключаются к общей измерительной схеме, изображенной на рис. 9. В одну из диагоналей каждого моста включен регулирующий элемент 9, а в противоположную диагональ — дифференциальный усилитель 11, с которого поступает сигнал на сумматор 12.

При действии термоудара изменяется тензочувствительность тензорезисторов 1—4, вместе с этим изменяется сопротивление терморезисторов 5—8 и, следовательно, величина сигнала, поступающего с усилителя 11 на сумматор 12. Измененный сигнал с сумматора 12, воздействуя на элемент 9, регулирует напряжение питания моста из терморезисторов таким образом, что сигнал на выходе усилителя 11 остается неизменным и равным по абсолютной величине опорному напряжению $U_{\text{оп}}$. Напряжение питания мостов изменяется обратно пропорционально изменению выходного сигнала моста из терморезисторов 5—8.

Поскольку мостовая измерительная цепь из терморезисторов размещена над мостовой измерительной цепью из тензорезисторов, закономерность изменения сигнала при воздействии термоудара с моста из терморезисторов адекватна изменению сигнала с моста из тензорезисторов. В результате этого выходной информативный сигнал усилителя 10 восста-

навливается и зависит только от изменения давления, а термоудар практически не влияет на выходную характеристику датчика. Здесь, как и в ранее рассмотренных случаях, включение механизма компенсации приводит к восстановлению информации.

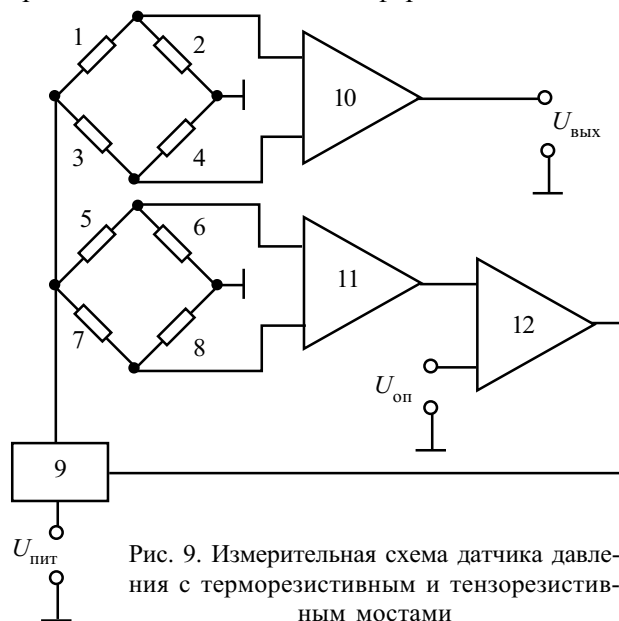


Рис. 9. Измерительная схема датчика давления с терморезистивным и тензорезистивным мостами

Тот же метод реализован и в устройствах для измерения давления с другими типами датчиков — датчиков со стержневым упругим элементом [9].

В каждом из рассмотренных вариантов технических решений задействован механизм компенсации дестабилизирующего фактора (температуры). При этом вначале устанавливается закон деградации, а затем выбирается закон изменения фактора, необходимый для компенсации [10].

Основные рекомендации, которые следует выполнять в целях уменьшения температурных погрешностей при разработке высокотемпературных и термоустойчивых датчиков давления, сводятся к следующему:

- конструкцию следует выполнять так, чтобы тепловое воздействие на элементы в цепи преобразования датчика было равномерным;
- не допускать возможности нагрева элементов конструкции датчика выше допустимой;
- стремиться использовать в электрических и контактных соединениях измерительных цепей датчика однородные металлы и сплавы, для контактных соединений — металлы и сплавы с высокой электропроводностью;
- стремиться к уменьшению числа контактных соединений из разнородных материалов;
- концентрировать элементы измерительной цепи датчика в зонах равных температур, стремиться к концентрации их в одной точке;
- выбирать материалы с температурно-независимым модулем упругости или незначительно меняющимся в рабочем интервале температур;
- применять материалы с низким температурным коэффициентом сопротивления;
- выбирать материалы сопрягаемых элементов датчика по коэффициенту теплового расширения так,

ДАТЧИКИ

чтобы при тепловом воздействии на эти элементы не возникало деформаций (необходимо, чтобы выполнялось условие обеспечения равенства абсолютных изменений линейных размеров сопрягаемых деталей); — применять материалы и вещества с низким коэффициентом объемного расширения.

ИСПОЛЬЗОВАННЫЕ ИСТОЧНИКИ

1. Васильев В. А. Классификация и методы уменьшения температурных погрешностей датчиков на основе твердотельных структур // Датчики и системы.— 2001.— № 12.— С. 6—7.
2. Васильев В. А. Уменьшение влияния дестабилизирующих факторов на информативный сигнал датчиков // Там же.— 2002.— № 4.— С. 12—15.
3. А. с. 1337691 СССР. Датчик давления / А. И. Тихонов, В. А. Тихоненков, А. И. Жучков, В. А. Васильев.— Оpubл. в Б. И.— 1987, № 48.
4. А. с. 1486766 СССР. Способ настройки интегральных тензометрических мостов датчиков мембранного

типа с радиальными и окружными тензорезисторами / В. А. Зиновьев, В. А. Васильев, А. И. Тихонов, В. А. Тихоненков.— Оpubл. в Б. И.— 1989, № 8.

5. Проектирование датчиков для измерения механических величин / Под ред. Е. П. Осадчего.— М.: Машиностроение, 1979.

6. А. с. 1490515 СССР. Устройство для измерения давления / В. А. Васильев, А. И. Тихонов.— Оpubл. в Б. И.— 1989, № 24.

7. А. с. 1597623 СССР. Устройство для измерения давления / В. А. Васильев, А. И. Тихонов.— Оpubл. в Б. И.— 1990, № 37.

8. А. с. 1377633 СССР. Датчик давления / В. А. Васильев.— Оpubл. в Б. И.— 1988, № 8.

9. А. с. 1515081 СССР. Устройство для измерения давления / В. А. Васильев, Е. П. Осадчий, А. И. Тихонов.— Оpubл. в Б. И.— 1989, № 38.

10. Васильев В. А. Информационный ресурс регистрирующих твердотельных структур // Измерительная техника.— 2002.— № 7.— С. 22—24.

1-я УКРАИНСКАЯ НАУЧНАЯ КОНФЕРЕНЦИЯ ПО ФИЗИКЕ ПОЛУПРОВОДНИКОВ

проходила с 9 по 14 сентября 2002 г. на базе Одесского национального университета им. И. И. Мечникова. Конференция с международным участием проходила под эгидой Национальной академии наук Украины, Министерства образования и науки Украины, Украинского физического общества, Института физики полупроводников НАНУ и ОНУ им. И. И. Мечникова. В конференции приняли участие более 300 представителей академических учреждений, вузов, НИИ и КБ Украины, представители университетов, научных организаций и фирм Беларуси, Венгрии, Германии, Голландии, Израиля, Молдовы, Польши, России, США, Чехии. Еще более внушительным был состав авторов докладов — представителей 29 государств.

Работа конференции проходила в следующих секциях:

1. Теоретические проблемы физики полупроводников.
2. Электронные и фононные явления в объеме и на поверхности полупроводников.
3. Наноструктуры и квантово-размерные эффекты.
4. Физика современных полупроводниковых приборов и сенсоров.
5. Полупроводниковые материалы и технологии.

Было заслушано 17 пленарных докладов, посвященных актуальным

фундаментальным и прикладным проблемам, связанным с квантово-размерными явлениями, физикой поверхности, разработкой функциональных материалов для микро- и оптоэлектроники, ИК-техники. Большой интерес вызвали проблемные доклады чл.-корр. НАНУ Литовченко В. Г. "Анализ фундаментальных параметров алмазоподобных кристаллов и низкоразмерных структур" (Киев), профессора из Нижнего Новгорода Красильника З. Ф. "Кремниевая оптоэлектроника на наноструктурах", чл.-корр. РАН Неизвестного И. Г. (Ин-т физики полупроводников СО РАН, Новосибирск) "Проблемы полупроводниковой элементной базы квантового компьютера и квантовой телепортации", чл.-корр. НАНУ Блонского И. В. (Киев) "Комбинированное влияние размерного фактора и фактора токовой неоднородности в формировании свойств излучающих структур на основе наноси", Ф. Коха (F. Koch) (Мюнхен) "Физика и химия нанокристаллического кремния" и С. А. Дж. Аммерлана (С. А. J. Ammerlaan) (Амстердам) "Спектроскопические характеристики редкоземельных примесей в полупроводниковых кристаллах".

В ходе конференции был организован конкурс докладов молодых ученых. Были отмечены доклады Сарикова А. В. "Солнечные элементы на основе поликристаллического кремния. Теория и эксперимент"

ВЫСТАВКИ. КОНФЕРЕНЦИИ. СИМПОЗИУМЫ

(Киев), Балабана А. П. "Насыщение сигнала в сенсорах оптического излучения на основе неидеального гетероперехода" (Одесса) и другие.

Конференция завершилась принятием решения, в котором, в частности, отмечены значительные успехи в развитии направления "Полупроводниковые фотоэлектрические преобразователи солнечной энергии" и признано целесообразным создание полигона по гелиоэнергетике в южном регионе Украины на базе ОНУ им. И. И. Мечникова с привлечением соответствующих организаций Украины.

Издан сборник тезисов докладов конференции в двух томах — пленарные и секционные доклады, стендовые доклады. По рекомендации Программного комитета материалы докладов будут опубликованы в журналах "Фотоэлектроника" (ОНУ им. И. И. Мечникова), "Semicond. Phys. Quant. Electron. Optoelectron." (ИФПП НАНУ), "Український фізичний журнал" (НАНУ), "Журнал фізичних досліджень" (Укр. физическое общество), "Funktional Materials (Ин-т монокристаллов НАНУ), "Технология и конструирование в электронной аппаратуре".

Принято также решение о регулярном проведении такой конференции с периодичностью в 2—3 года.

Д. ф.-м. н. Я. И. Летих