

ПРИБОРОСТРОЕНИЕ, МЕТРОЛОГИЯ И ИНФОРМАЦИОННО- ИЗМЕРИТЕЛЬНЫЕ ПРИБОРЫ И СИСТЕМЫ

УДК 621.31:681.586.5'326

А. Д. БЯЛИК

Новосибирский государственный
технический университет,
г. Новосибирск

ИНЖЕНЕРНАЯ МЕТОДИКА РАСЧЕТА ФУНКЦИИ ПРЕОБРАЗОВАНИЯ АМПЛИТУДНЫХ ВОЛОКОННО- ОПТИЧЕСКИХ ДАТЧИКОВ

Предложена инженерная методика расчета функции преобразования волоконно-оптических датчиков. Данная методика представляет собой упрощенный пошаговый подход к определению функции преобразования. Это существенно облегчает проектирование волоконно-оптических датчиков, в которых преобразование измеряемой величины осуществляется в несколько этапов, принципиально различающихся по математическому описанию. Вместе с тем в предлагаемой методике учитываются основные параметры функции преобразования (чувствительность и нелинейность) и их зависимость от конструктивных особенностей волоконно-оптических датчиков. В качестве примера рассматривается методика построения функции преобразования амплитудных волоконно-оптических датчиков давления рефлектометрического типа.

Ключевые слова: инженерная методика построения функции преобразования, амплитудный волоконно-оптический датчик давления.

Введение. Исследование в области разработки амплитудных волоконно-оптических датчиков (ВОД) давления как элементов систем управления и контроля обусловлено как преимуществами ВОД в целом перед существующими тензорезистивными и емкостными аналогами (нечувствительность

к электромагнитным полям, пожаро-, взрыво-, электробезопасность), так и специфическими особенностями амплитудных датчиков, которые, в отличие от интерферометрических ВОД, не требуют обязательного использования когерентных источников излучения и одномодовых оптических волокон. Как

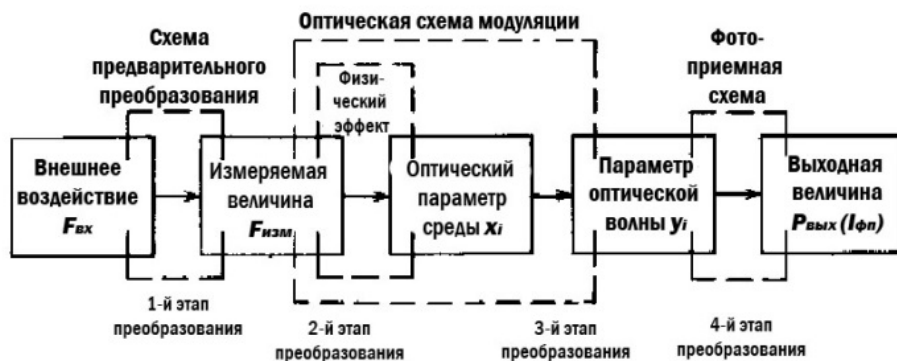


Рис. 1. Общая структура преобразования в волоконно-оптических датчиках

следствие, существенно упрощаются настройка, юстировка и эксплуатация ВОД.

Однако необходимо отметить, что разработка и проектирование волоконно-оптических датчиков предполагает исследование в междисциплинарной области на стыке механики, оптики и микроэлектроники. В силу этого функция преобразования ВОД представляет собой сложную многоступенчатую зависимость, математически точное построение которой в ряде случаев является нецелесообразным для инженерных расчетов.

Таким образом, целью данной статьи является разработка практически удобной методики построения функции преобразования для волоконно-оптических датчиков.

Основная часть. Общая структура преобразования ВОД рассматривается в работах [1–3] и показана на рис. 1.

Схема предварительного преобразования необходима, если нельзя непосредственно измерить исследуемую величину или в наличии уже имеется датчик для измерения другого физического параметра [1]. В схеме предварительного преобразования могут использоваться различные физические принципы преобразования (механический, электромеханический, электромагнитный и т.д.).

Далее измеряемая величина (непосредственно или после предварительного преобразования) воздействует на параметры оптической среды, то есть системы, по которой распространяется оптическое излучение. Параметрами оптической среды, которые изменяются под влиянием внешнего воздействия, могут являться: показатель преломления (n), коэффициент поглощения (χ), изменение линейных размеров (например, длины оптического пути).

Далее при помощи схем оптической модуляции изменение параметров оптической среды приводит к изменению параметров оптической волны (амплитуды, фазы, поляризации, частоты оптического излучения). Поскольку параметры оптической волны крайне затруднительно воспринимать и анализировать непосредственно, то обычно при помощи фотоприемника измеряемая величина преобразуется в электрический сигнал (напряжение, ток или их изменение). Для детектирования и измерения изменений параметров оптической волны могут использоваться различные фотоприемные схемы (непосредственное измерение, анализатор угла поворота плоскости поляризации, спектрально-чувствительные фотоприемники, позиционно-чувствительные фотоприемники). С помощью стандартных изделий микроэлектроники с заранее известными характе-

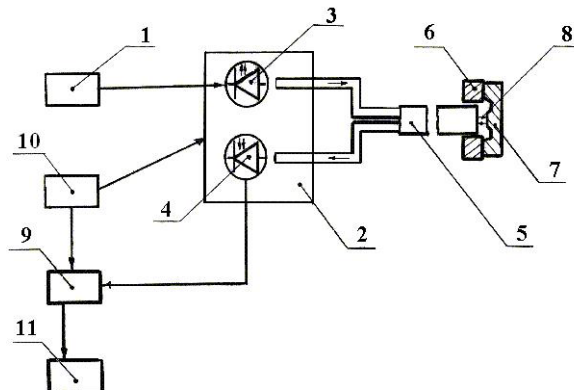


Рис. 2. Структурная схема амплитудного волоконно-оптического датчика давления рефлектометрического типа

ристиками измеряемую величину можно усилить или ослабить, нормировать, фильтровать, перевести в цифровую форму.

В большинстве случаев окончательно регистрируемой величиной является амплитуда тока ($I_{ФП}$) или напряжения ($U_{ФП}$) на выходе фотоприемника.

В итоге общую функцию преобразования датчиков можно представить в следующем виде [1]:

$$I_{ФП} = P_{ИИ}(I_{ИИ}) \cdot f_{ФП} \{ y_i [x_i (F_{ИЗМ}(F_{ВХ}))] \} S_{ФП} k_{П}, \quad (1)$$

где $I_{ФП}$ — выходной сигнал; $P_{ИИ}(I_{ИИ})$ — мощность источника оптического излучения, создаваемого при протекании по нему тока ИИ; $f_{ФП}$ — функция фотоприемного преобразования; $S_{ФП}$ — интегральная чувствительность фотоприемника; $F_{ВХ}$ — внешнее воздействие; $k_{П}$ — коэффициент потерь мощности оптического излучения при $F_{ВХ} = 0$; $F_{ИЗМ}$ — измеряемая величина; x_i — оптический параметр среды; y_i — параметр оптической волны.

Очевидно, что для инженерных задач целесообразно использовать упрощенные методы расчета функции преобразования датчиков.

Одним из примеров реализации датчиков с использованием оптического волокна может служить амплитудный ВОД давления рефлектометрического типа, описанный в [4–6] и показанный на рис. 2.

Данный ВОД содержит стабилизированный источник тока (1), металлический корпус (2) с источником (3) и приемником (4) оптического излучения (ик-светодиод и ик-фотодиод соответственно), оптические волокна, собранные в кабель (5), кремниевая подложка (6) для чувствительного элемента — упругого микрзеркала (7), блок электронной

обработки сигнала с фотоприемника (9), блок термостабилизации (10), индикатор (11). Цифрой (8) обозначен ход оптического излучения.

Оптические волокна (5) являются линией передачи оптического излучения от источника (3) к упругому микрозеркалу (7) и от микрозеркала (7) к фотоприемнику (4). Кремниевое основание (6) необходимо для механической развязки упругого микрозеркала (7) с остальными элементами конструкции датчика и для фиксации упругого микрозеркала (7) на строго определенном расстоянии от торцов оптических волокон (5).

Упругое микрозеркало (7) служит для преобразования давления в перемещение, которому пропорционален поток отраженного оптического излучения, попадающего на торцы оптических волокон (5). Блок термостабилизации (10) предназначен для исключения влияния изменений температуры окружающей среды на источник (3) и приемник (4) оптического излучения и блок электронной обработки (9).

Принцип действия амплитудных ВОД рефлектометрического типа заключается в перераспределении интенсивности потока оптического излучения при отражении от перемещающегося под действием давления упругого микрозеркала. Поэтому при проектировании амплитудных ВОД исходят из анализа перемещения микрозеркала относительно неподвижных оптических волокон в отличие от тензорезистивных датчиков, где важно изменение механических напряжений в упругих элементах, или изменение емкости конденсатора с подвижной обкладкой в емкостных датчиках [4, 5].

Функция преобразования применительно к амплитудным волоконно-оптическим датчикам давления рефлектометрического типа, в частности, рассмотренным в [5, 6], имеет вид:

$$U = F_3 \{ F_2 [F_1 (p)] \} \quad (2)$$

или

$$\Delta p \rightarrow \Delta x \rightarrow \Delta J \rightarrow \Delta U,$$

где Δp — давление или изменение давления; Δx — смещение чувствительного элемента; ΔJ — изменение потока оптического излучения; ΔU — изменение выходного сигнала; F_1 , F_2 , F_3 — частные функции преобразования, которое в данном случае соответствует трем этапам преобразования:

F_1 — функция механического преобразования. Описывает зависимость смещения упругого чувствительного элемента ВОД под воздействием измеряемого давления;

F_2 — функция преобразования оптической модуляции. Описывает изменение интенсивности светового потока, отраженного от поверхности упругого чувствительного элемента (микрозеркала) в зависимости от смещения последнего. Данную функцию целесообразно представить в виде двух составляющих [5]:

$$F_2 = F_{2c} \cdot F_{2H}, \quad (3)$$

где F_{2c} — составляющая функции преобразования оптической модуляции, связанная со стандартизованными характеристиками элементов конструкции; F_{2H} — составляющая функции преобразования оптической модуляции, связанная со свойствами элементов конструкции с переменными свойствами

и характеристиками; F_3 — функция электрического преобразования. Описывает изменение электрического выходного сигнала в зависимости от изменения интенсивности светового потока.

Как показывают расчеты и экспериментальные исследования, приведенные, в частности, в работах [6–9], функция преобразования амплитудного ВОД давления рефлектометрического типа в широком диапазоне входных воздействий обладает существенной нелинейностью (десять процентов), что приводит к необходимости поиска оптимального начального расстояния между торцами оптических волокон и упругого микрозеркала, а также формы и геометрических размеров последнего, то есть выбора рабочей точки.

Как показано в работах [5, 6], наибольший вклад в нелинейность полной функции преобразования вносит составляющая, связанная с функцией оптического преобразования (F_2). В качестве количественного критерия выбора рабочей точки можно рассматривать минимум по модулю числа δ , которое определяется выражением (4):

$$\delta = \frac{Nl_2 \cdot (L - L_0)}{S_2}, \quad (4)$$

где Nl_2 , S_2 — нелинейность и чувствительность частной функции преобразования F_2 в данном диапазоне перемещений;

$$L = L_0 + W_{max}, \quad (5)$$

где L_0 — текущее положение рабочей точки (начальное расстояние между торцами оптических волокон и упругим микрозеркалом при отсутствии входного воздействия), W_{max} — максимальное смещение упругого микрозеркала от положения равновесия под воздействием измеряемого параметра для данного L_0 .

В свою очередь, общий вид частной функции преобразования F_2 описан в работах [5, 6].

Для построения частной функции преобразования F_2 была рассмотрена модель, представленная на рис. 3, включающая два оптических волокна (излучающее и приемное) и отражающее микрозеркало, нормаль которого параллельна осям оптических волокон.

В датчиках давления микрозеркало одновременно является и упругим элементом (УЭ), на которое воздействует давление измеряемой среды.

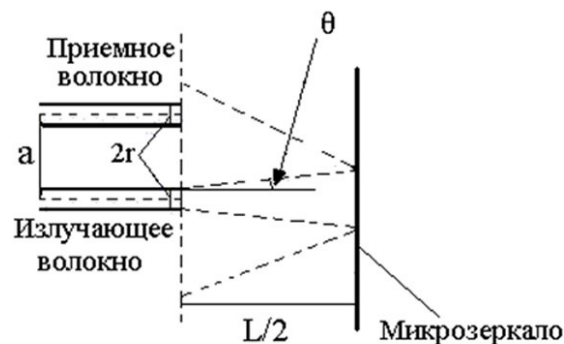


Рис. 3. Схема, описывающая перераспределение потока оптического излучения в случае амплитудного ВОД давления

Это порождает специфическую особенность проектирования микрзеркал: необходимо обеспечить максимальное перемещение при деформациях микрзеркала, не превосходящих предельно допустимых.

Учитывая это, функцию преобразования F_2 можно представить в виде, удобном для анализа влияния геометрических параметров на чувствительность и нелинейность:

$$\frac{I}{I_0} = \frac{1}{2 \cdot \pi} \left[\frac{\alpha - \sin \alpha}{(1+z \cdot \operatorname{tg} \vartheta)^2} + \beta - \sin \beta \right], \quad \text{если } \frac{v-2}{\operatorname{tg} \vartheta} \leq z \leq \frac{v}{\operatorname{tg} \vartheta}$$

$$\frac{I}{I_0} = \frac{1}{(1+z \cdot \operatorname{tg} \vartheta)^2}, \quad \text{если } z < \frac{v}{\operatorname{tg} \vartheta}$$

$$\frac{I}{I_0} = 0, \quad \text{если } z < \frac{v}{\operatorname{tg} \vartheta},$$

где $\alpha = 2 \cdot \arccos \frac{1+v^2+(1+z \cdot \operatorname{tg} \vartheta)^2}{2 \cdot v}$, $\beta = 2 \cdot \arcsin \left[\frac{\sin \alpha / 2}{1+z \cdot \operatorname{tg} \vartheta} \right]$, $z = \frac{L}{r}$ — приведенное расстояние между торцами оптических волокон и микрзеркалом («рабочая точка»); $v = \frac{a}{r}$ — приведенное расстояние между осями оптических волокон.

На рис. 4 приведен график типичной зависимости приведенного выходного сигнала $u = I/I_0$ от приведенного расстояния $z = L/r$.

Для практических целей чувствительность и нелинейность функции преобразования F_2 определяется соответственно как:

$$S_2 = \frac{dy}{dx}, \quad (7)$$

$$NI_2 = \frac{d^2y}{dx^2}. \quad (8)$$

Чувствительность и нелинейность частной функции преобразования F_2 зависят от ряда конструктивных параметров: v , z , θ , r .

В окрестностях рабочей точки нелинейность частной функции преобразования F_2 лежит в пределах 0,1–0,5 %, что является приемлемым для элементов измерительных систем.

При таких условиях полную функцию преобразования рассматриваемой конструкции волоконно-оптического датчика можно считать близкой к линейной.

Приближенно линеаризованная полная функция преобразования (2) в случае амплитудных ВОД давления рефлектометрического типа, описанных в [5], может быть представлена в виде:

$$u_{\text{вых.}} = S_{\text{вод}} \cdot k_y \cdot p, \quad (9)$$

где p — номинальное давление, k_y — коэффициент усиления блока электронной обработки, $S_{\text{вод}}$ — чувствительность полной функции преобразования

$$S_{\text{вод}} = k_\phi \cdot P_0 \cdot S_2 \cdot S_1 \cdot \eta \quad (10)$$

где k_ϕ — коэффициент преобразования фотоприемника, P_0 — мощность излучения, испускаемого источником, S_1 и S_2 — чувствительности частных функций преобразования механического (F_1) и оптического (F_2) преобразования соответствен-

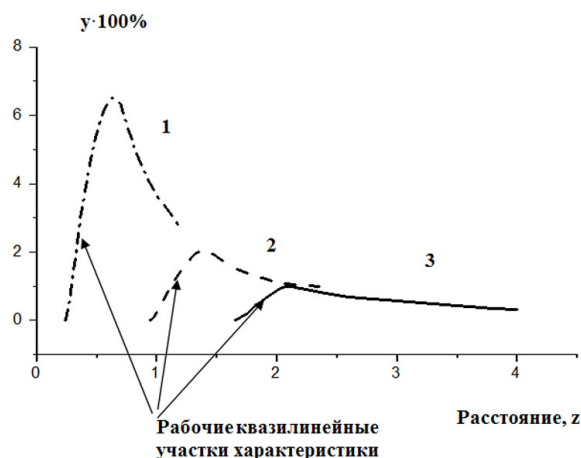


Рис. 4. Зависимость приведенного выходного сигнала от приведенного расстояния при разных v (1 — $v=3$; 2 — $v=6$; 3 — $v=9$)

но, η — коэффициент ослабления оптического излучения в волоконно-оптическом преобразователе, определяемый потерями на вводе излучения в оптические волокна и неидеальностью отражения от микрзеркала.

Коэффициент преобразования фотоприемника k_ϕ определяется выражением

$$u = k_\phi \cdot P_\phi, \quad (11)$$

где u — выходной сигнал фотоприемника, P_ϕ — мощность потока оптического излучения, падающая на фотоприемник и пропорциональная мощности светового потока, излучаемого источником P_0 .

Нелинейность полной функции преобразования определяется как

$$NI = \sqrt{NI_1^2 + NI_2^2 + NI_3^2}, \quad (12)$$

где NI_1 , NI_2 , NI_3 — нелинейности частных функций преобразования механического, оптического и электрического преобразования соответственно.

Заключение. Проектирование амплитудных волоконно-оптических датчиков давления рефлектометрического типа может быть осуществлено согласно общей функции преобразования и техническому заданию (требуемого диапазона давлений, чувствительности, нелинейности) и может быть представлен в следующей последовательности действий [1, 5]:

1. Определение размеров чувствительного элемента.
2. Определение начального расстояния между торцами оптических волокон и чувствительным элементом — упругим микрзеркалом.
3. Определение величины выходного сигнала. Определяется коэффициентом преобразования фотоприемника k_ϕ и коэффициентом усиления схемы электронной обработки.
4. Определение чувствительности и нелинейности датчика в целом.
5. Определение коэффициента ослабления оптического излучения η . Определяется апертурами и соотношением площадей сердечников оптических волокон и источников и приемников света.

Примером реализации расчетов, согласно приведенной методике, является описанный в [5]

амплитудный волоконно-оптический датчик давления рефлектометрического типа, используемый в качестве измерителя перепадов давления трансформаторного масла в силовом трансформаторе.

Библиографический список

1. Бусурин В. И., Носов Ю. Р. Волоконно-оптические датчики: физические основы расчёта и применения. М.: Энергоатомиздат, 1990. 254 с.
2. Окоси Т. [и др.] Волоконно-оптические датчики / под общ. ред. Т. Окоси. Л.: Энергоатомиздат, 1990. 256 с.
3. Vaganov V. I. Construction problems in sensors // Sensors and actuators. A. 1991. № 28. С. 161–172.
4. Гридчин В. А., Бялик А. Д. Математическое моделирование мембранных чувствительных элементов амплитудных волоконно-оптических датчиков давления // Автометрия. 2005. Т. 41, № 3. С. 56–63.
5. Бялик А. Д. Разработка и исследование амплитудных волоконно-оптических датчиков давления: дис. ... канд. техн. наук: 05.11.13: защищена 23.12.2009; утв. 09.04.2010. Омск: ОмГТУ, 2009. 169 с.
6. Бялик А. Д. Исследование основных параметров преобразовательных характеристик амплитудных волоконно-опти-

ческих датчиков давления рефлектометрического типа // Омский научный вестник. Сер. Приборы, машины и технологии. 2009. № 3 (83). С. 220–222.

7. Гридчин В. А., Бялик А. Д. Особенности проектирования амплитудных волоконно-оптических датчиков давления, использующих кремниевые мембранные чувствительные элементы // Приборы. 2005. № 7. С. 25–29.
8. Мурашкина Т. И., Волчихин В. И. Амплитудные волоконно-оптические датчики автономных систем управления: моногр. Пенза: Информ.-издат. центр ПГУ, 1999. 173 с.
9. Пивкин А. Г., Бадеева Е. А., Гориш А. В. [и др.]. Теоретические основы проектирования амплитудных волоконно-оптических датчиков давления с открытым оптическим каналом: моногр. М.: МГУЛ, 2004. 246 с.

БЯЛИК Александр Давидович, кандидат технических наук, доцент кафедры «Полупроводниковые приборы и микроэлектроника».
Адрес для переписки: bialik@ngs.ru

Статья поступила в редакцию 17.02.2017 г.
© А. Д. Бялик

УДК 621.391.8

Г. М. СИДЕЛЬНИКОВ
С. А. МОРОЗОВ
В. И. СЛАТУХИНА

Сибирский
государственный университет
телекоммуникаций и информатики,
г. Новосибирск

СРАВНИТЕЛЬНЫЙ АНАЛИЗ ПОМЕХОУСТОЙЧИВОСТИ СИГНАЛОВ С ФРМ И ФМ В КАНАЛАХ С РАЗЛИЧНОЙ СТРУКТУРОЙ

В работе ставится задача на основе аппарата векторной алгебры и статистического моделирования на ЭВМ получить функции распределения вероятностей межсимвольной интерференции сигналов для фазовой и фазоразностной модуляции в каналах с различной структурой. Полученные вероятностные характеристики позволят определить эффективность применения сигналов в различных каналах, а также провести анализ помехоустойчивости при различных уровнях аддитивных помех, а также позволят определить возможность применения в таких каналах разнесения как на приеме, так и на передаче.

Ключевые слова: дополнительный сдвиг фаз, вероятность ошибок, интегральная функция распределения вероятностей.

1. Введение. Анализ помехоустойчивости дискретных систем связи в каналах с частотно-селективными замираниями основан на применении аппарата системных функций [1], где параметрам многолучевого поля служила функция рассеяния импульсного отклика по времени задержки. Расчет помехоустойчивости сигналов с относительной фазовой модуляцией (ОФМ) для таких каналов приведен в [2]. В работе [3] сделан расчет веро-

ятности ошибки уже для некогерентного приема сигналов (ОФМ) и некогерентного приема сигналов с дискретной частотной модуляцией с различной структурой, где показано, что при задержках отраженных лучей относительно основного луча, соизмеримых с длительностью посылки, помехоустойчивость не может удовлетворять ни одну систему связи. Для повышения помехоустойчивости [3] сделан анализ системы с разнесением на приеме,

как единственно возможного способа для сигналов с малой базой.

Переход от аппарата системных функций к более тонкой структуре поля показан в [4], где на примере двухлучевого канала с постоянными параметрами приводится расчет вероятности ошибки сигналов с фазовой модуляцией в зависимости от задержки и амплитуды второго луча. Дальнейшее развитие этот метод анализа получил при воздействии уже асинхронной структурной помехи [5].

Повышение помехоустойчивости современных систем связано уже с применением разнесения как на приеме, так и на передаче [6], но, как правило, расчет вероятности ошибки приводится для каналов с общими замираниями.

Каналы с частотно-селективным замиранием отличаются многообразием. Для условий города параметры многолучевого поля зависят от подвеса антенн, для границ зон обслуживания двух станций — оно двухлучевое, внутри зон обслуживания — многолучевое. Следует отметить, что свой вклад вносит и применение типа модуляции.

Несколько иной подход к анализу помехоустойчивости показан в работе [7], на основе аппарата векторной алгебры было получено векторное представление параметров межсимвольной интерференции для сигналов с фазовой модуляцией (ФМ) и фазоразностной модуляцией (ФРМ) [8]. Были получены граничные значения предельных амплитуд запаздывающих лучей для различной кратности модуляции. Особенностью сигналов с ФРМ является то, что решение о переданном сигнале принимается на основе обработки двух соседних посылок, в то время как для ФМ — на одной посылке. Эта особенность сильно меняет характер образования межсимвольной интерференции (МСИ) с их применением [9].

В работах [7, 9] приводятся особенности образования (МСИ) для сигналов с ФМ и ФРМ, но нет сравнения их эффективности применения для каналов с различной структурой.

Целью работы является получение интегральных функций распределения вероятностей МСИ сигналов с ФМ и ФРМ для сравнения эффективности их применения в каналах с различной структурой. Данное сравнение покажет, в каких каналах эффективны сигналы с ФМ, а в каких — сигналы с ФРМ.

2. Образование межсимвольной интерференции в двухлучевом канале для сигналов однократной ФРМ и ФМ. Как показано в [7], где на основе аппарата векторной алгебры получено векторное представление параметров межсимвольной интерференции (МСИ) для каналов с дискретной многолучевостью, возможно представить преобразование сигналов в следующей последовательности.

При задержке второго луча $\tau_3 < T$, сигналы на соседних посылках:

$$S_{\Sigma}^n(t) = A_0 \sin(\omega t + \varphi_n) + A_3 \sin[\omega(t - \tau_3) + \varphi_{n+1} + \varphi_0] + A_3 \sin[\omega(t - (T - \tau_3)) + \varphi_n + \varphi_0],$$

$$S_{\Sigma}^{n-1}(t) = A_0 \sin(\omega t + \varphi_{n-1}) + A_3 \sin[\omega(t - \tau_3) + \varphi_n + \varphi_0] + A_3 \sin[\omega(t - (T - \tau_3)) + \varphi_{n-1} + \varphi_0],$$

где φ_n, φ_{n-1} — информационные значения фаз; φ_0 — набег фазы второго луча; A_0 — амплитуда основного луча; A_3 — амплитуда задержанного луча.

Суммарные вектора сигналов на двух посылках можно представить как:

$$S_{\Sigma}^n(t) = A_{\Sigma}^n \sin(\omega t + \varphi_n + Q_n + \varphi_0) \quad (1)$$

$$S_{\Sigma}^{n-1}(t) = A_{\Sigma}^{n-1} \sin(\omega t + \varphi_{n-1} + Q_{n-1} + \varphi_0), \quad (2)$$

где $A_{\Sigma}^n, A_{\Sigma}^{n-1}$ — амплитуды результирующих сигналов на n и $n-1$ посылках соответственно и Q_n, Q_{n-1} — дополнительный сдвиг фаз за счет межсимвольной интерференции (МСИ) определяется через квадратурное представление сигналов

$$A_{\Sigma}^n = \sqrt{X_n^2 + Y_n^2}, \quad Q_n = \arctg \frac{X_n}{Y_n}, \quad (3)$$

$$X_n = \sin \varphi_n + \frac{A_3}{A_0} \left(1 - \frac{\tau_3}{T} \right) \sin(\varphi_n + \varphi_0) + \frac{A_3}{A_0} \left(\frac{\tau_3}{T} \right) \sin(\varphi_{n+1} + \varphi_0) \quad (4)$$

$$Y_n = \cos \varphi_n + \frac{A_3}{A_0} \left(1 - \frac{\tau_3}{T} \right) \cos(\varphi_n + \varphi_0) + \frac{A_3}{A_0} \left(\frac{\tau_3}{T} \right) \cos(\varphi_{n+1} + \varphi_0) \quad (5)$$

Для определения (МСИ) для фазовой модуляции необходимо воспользоваться соотношениями (1), (3), (4), (5), а для фазоразностной модуляции — (1–5). Приведенные выше выражения (1–5) характерны для $\tau_3 < T$ с учетом $\varphi_{n+1}, \varphi_n, \varphi_{n-1}, \varphi_0$.

Параметры МСИ необходимо рассчитывать для всевозможных комбинаций интерферирующих символов $\varphi_{m+1}, \varphi_n, \varphi_{n-1}, \frac{A_3}{A_0}, \frac{\tau_3}{T}, \varphi_0$.

В общем виде необходимо определять функционал

$$\Delta Q = \Phi \left(\varphi_{n+1}, \varphi_n, \varphi_{n-1}, \frac{A_3}{A_0}, \frac{\tau_3}{T}, \varphi_0 \right). \quad (6)$$

Как показали вычисления согласно (1) – (5), дополнительный сдвиг возникает только для определенных комбинаций информационных символов в зависимости от $\left(\frac{A_3}{A_0}, \frac{\tau_3}{T}, \varphi \right)$. Так, для сигналов с ФРМ

$$\Delta Q(\pi, 0, \pi) = \Delta Q(\pi, \pi, \pi) = \Delta Q(0, 0, 0) = \Delta Q(0, \pi, 0)$$

$$\Delta Q(\pi, 0, 0) \neq 0, \Delta Q(\pi, \pi, 0) \neq$$

$$\neq 0, \Delta Q(0, 0, \pi) \neq 0, \Delta Q(0, \pi, \pi) \neq 0. \quad (7)$$

На рис. 1 показана последовательность интерферирующих информационных посылок сигнала для случая задержки менее длительности посылки T и более $2T$. Первый случай характерен внутри зоны обслуживания, а второй — на границах зон обслуживания, где второй задержанный луч является сигналом соседней станции, работающей на той же несущей частоте, что и первый [8].

Рассмотрим обобщенное выражение для последовательности (a, b, c, d, e) в виде $\Delta Q \left(\begin{smallmatrix} (a,b) \\ (c,d,e) \end{smallmatrix} \right)$, где значение символов может быть 0 или π , тогда выражение (6) можно представить как:

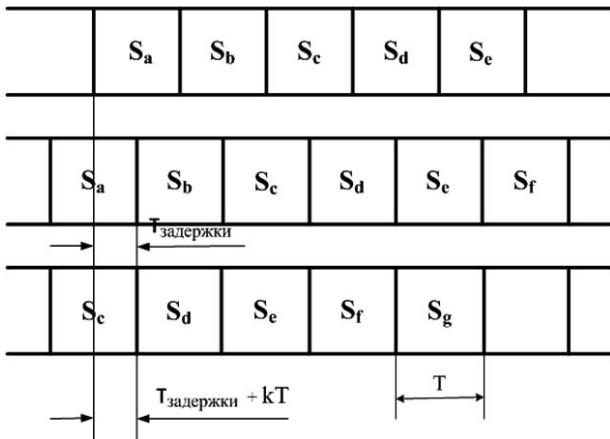


Рис. 1. Временные последовательности основного, задержанного сигнала

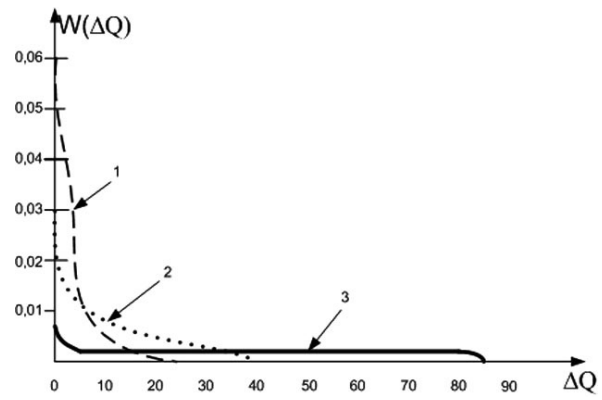


Рис. 3. Плотность распределения вероятностей МСИ сигналов с ФМ для равномерного распределения фазы, задержки для разного уровня второго луча. 1 — $A_3 = 0,5A_0$, 2 — $A_3 = 0,9A_0$, 3 — $A_3 = 0,99A_0$

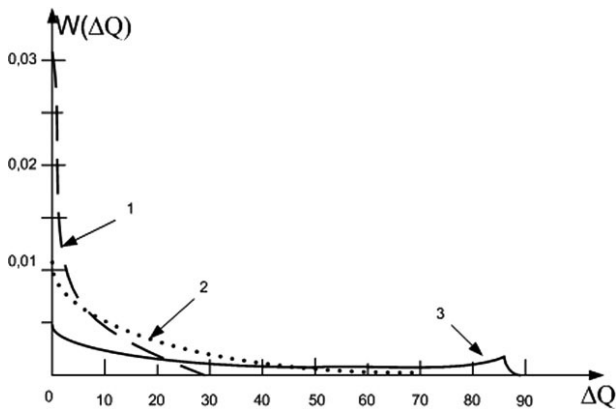


Рис. 2. Плотность распределения вероятностей МСИ сигналов с ФРМ для равномерного распределения фазы, задержки для разного уровня второго луча: 1 — $A_3 = 0,5A_0$, 2 — $A_3 = 0,9A_0$, 3 — $A_3 = 0,99A_0$

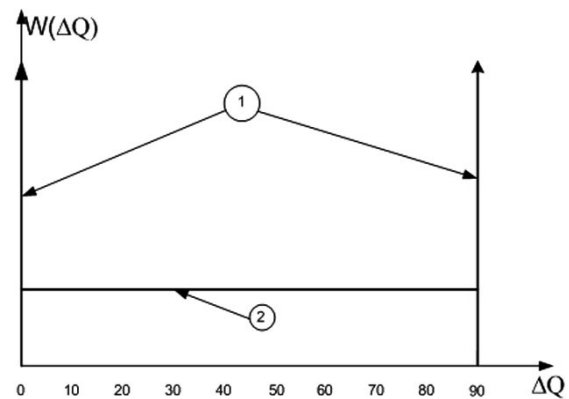


Рис. 4. Плотность распределения вероятностей МСИ сигналов с ФРМ и ФМ для равномерного распределения фазы, задержки $\tau_3 = T$, $A_3 = A_0$, где 1 — ФРМ, 2 — ФМ

$$\Delta Q = \Phi \left(\varphi_a, \varphi_b, \varphi_c, \varphi_d, \varphi_e, \frac{A_3}{A_0}, \frac{\tau_3}{T}, \varphi_0 \right). \quad (8)$$

При рассмотрении всех сочетаний символов для восьми комбинаций нет дополнительного сдвига фаз, для 16 комбинаций характер ΔQ такой же, как при задержках менее длительности посылки, для четырех комбинаций характер кардинально меняется. Такими комбинациями являются $\Delta Q_{(\pi,0,\pi)}$, $\Delta Q_{(0,\pi,0)}$, $\Delta Q_{(\pi,\pi)}$, $\Delta Q_{(0,\pi,0)}$. Для комбинаций $\Delta Q_{\left(\frac{0,\pi}{\pi,\pi,\pi}\right)}$, $\Delta Q_{\left(\frac{0,\pi}{0,0,0}\right)}$, $\Delta Q_{\left(\frac{0,\pi}{\pi,\pi,\pi}\right)}$, $\Delta Q_{\left(\frac{\pi,0}{\pi,\pi,\pi}\right)}$ пропадает зависимость от задержки.

Для комбинации $\Delta Q_{(0,0)}$ величина дополнительного сдвига фаз в первую очередь определяется задержкой, и во вторую очередь — величиной $\frac{A_3}{A_0}$, причем максимальное значение достигается для $\frac{A_3}{A_0} = 0,99$ для τ_3 , равному началу или концу посылки. A_0 Обобщая рассмотренные выше зависимости, можно отметить, что дополнительный сдвиг фаз, вызванный многолучевым распространением, определяется амплитудой, задержкой, фазой второго луча, а также сочетанием информационных символов [7].

Как показали расчеты МСИ [7] для сигналов ФМ на основании выражений (2), (3), (4), (5), дополнительный сдвиг фазы присутствует всегда вне зависимости от сочетаний интерферирующих символов, но, в отличие от сигналов с ФРМ, увеличение МСИ происходит линейно как от амплитуды, так и от фазы второго луча, а задержка лишь перераспределяет значение ΔQ по оси фаз. Для комбинации $\left(\frac{0}{0,0}\right), \left(\frac{0}{\pi,0}\right), \left(\frac{\pi}{0,0}\right), \left(\frac{\pi}{\pi,0}\right)$ зависимость МСИ от задержки пропадает, а определяется только амплитудой и фазой второго луча [7].

3. Статистические характеристики МСИ сигналов с ФРМ и ФМ. Сравнительный анализ эффективности применения сигналов с ФРМ и ФМ в каналах с МСИ требует знания вероятностных характеристик, таких как плотность распределения вероятностей или интегральной функции распределения вероятностей дополнительного сдвига фаз. Эти характеристики необходимы для определения средней вероятности ошибки с учетом действия аддитивной помехи для каналов связи с различной структурой.

На рис. 2 и 3 приведены плотности распределения вероятностей дополнительного сдвига фаз ΔQ для сигналов ФРМ и ФМ при равномерном распределении $W\left(\frac{t_3}{T}\right), W(\varphi)$, при этом величина задержки не превышает длительности посылки T .

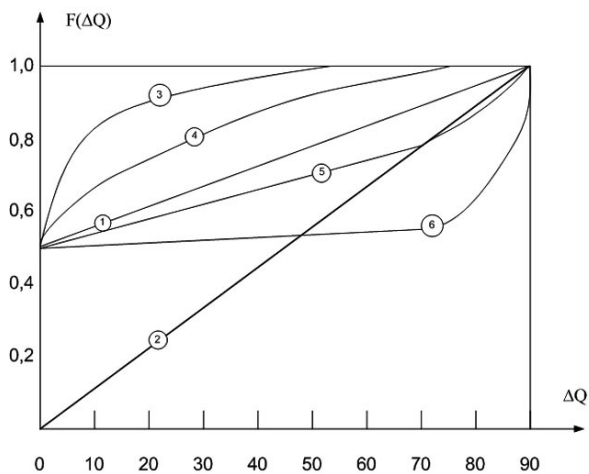


Рис. 5. Интегральная функция ΔQ для равномерного распределения фаз, $A_3 = A_0$ и различных задержек:

- 1 — $\frac{t_3}{T} = 0,5$ для ФРМ, 2 — $\tau_3 = T$ ФМ, 3 — $\frac{t_3}{T} = 0,1$ ФРМ,
 4 — $\frac{t_3}{T} = 0,3$ ФРМ, 5 — $\frac{t_3}{T} = 0,7$ ФРМ, 6 — $\frac{t_3}{T} = 0,9$ ФРМ

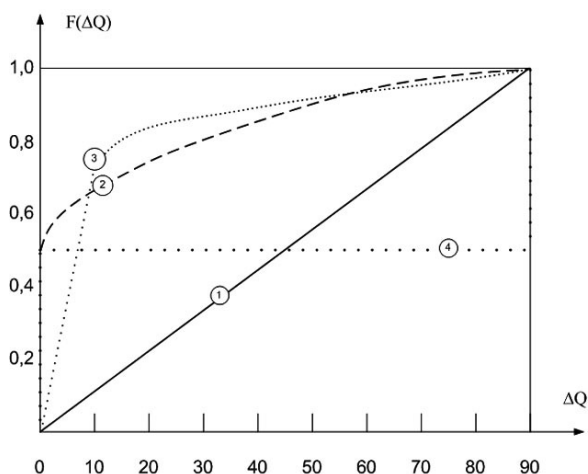


Рис. 6. Интегральная функция ΔQ для равномерного распределения фаз, задержек в пределах длительности посылки для ФМ и ФРМ:

- 1 — $A_3 = A_0$ ФМ, 2 — для равномерного распределения амплитуд задержанного луча ФРМ, 3 — для равномерного распределения амплитуд задержанного луча ФМ, 4 — $A_3 = A_0$ ФРМ

Приведенные плотности распределения показывают, что при равных условиях, сигналы с ФРМ быстрее стремятся к критическому значению $\Delta Q = 90^\circ$, чем сигналы с ФМ. При значении $\tau_3 = T$, $A_3 = A_0$ плотность распределения для ФРМ представляет собой две дельта-функции с вероятностью 0,5 (рис. 4), а для сигналов с ФМ распределение равномерное, что уже предопределяет большую эффективность сигналов с ФМ.

Дальнейшее рассмотрение будем проводить на основе интегральных функций, так как они позволяют сравнить условия эффективности применения сигналов при МСИ.

На рис. 5 показано, что при $\frac{t_3}{T} < 0,7$ сигналы с ФРМ имеют меньшее значение ΔQ , чем сигнала

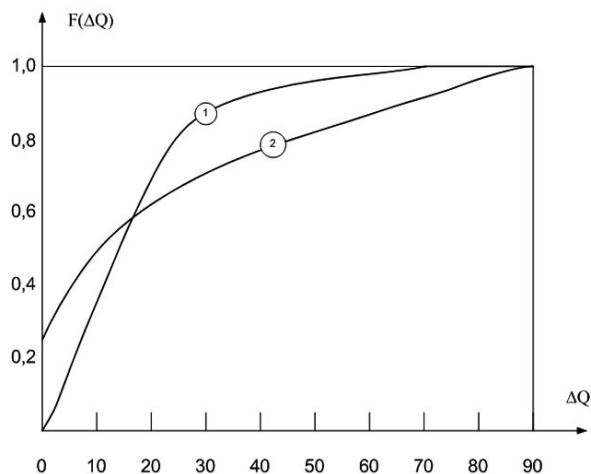


Рис. 7. Интегральная функция ΔQ для равномерного распределения фаз, равномерного распределения амплитуд и задержек, превышающей длительности посылки: для ФМ — 1 и ФРМ — 2

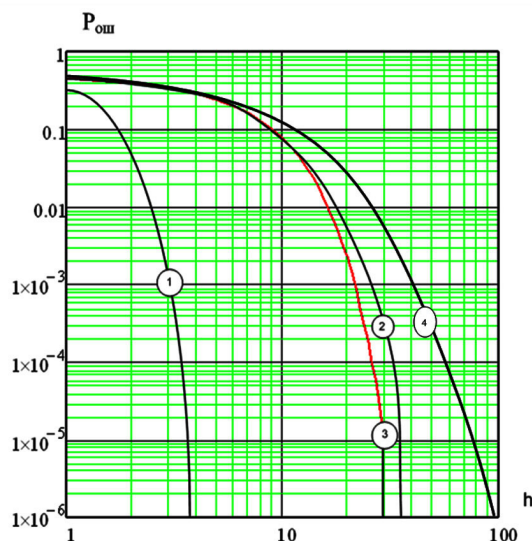


Рис. 8. Зависимость средней вероятности ошибки когерентного приема сигналов с ФРМ и ФМ для различных параметров канала с дискретной многолучевостью: 1 — в отсутствии отраженных лучей; 2 — для сигналов с ФРМ; 3 — для ФМ при задержках в пределах длительности посылки; 4 — для сигналов с ФРМ при задержках, значительно превышающих длительность посылки

лы с ФМ, при $\frac{t_3}{T} < 0,7$ они проигрывают сигналам с ФМ. Для экспоненциального распределения задержек [3] эффективность сравнима между собой.

На рис. 6 представлены два крайних случая, зависимость (1) и (4), которые показывают определяющую роль задержки для сигналов с ФРМ, в отличие от ФМ.

Как видно из рис. 6, малые значения ΔQ для ФРМ, а большие значения ΔQ для ФМ. Учитывая тот факт, что определяющую роль играют большие значения ΔQ , то помехоустойчивость сигналов с ФМ выше, чем при ФРМ.

На рис. 7 приведены кривые $F(\Delta Q)$ для случая, когда задержки значительно превышают длительность посылки, учитываются все 32 комбинации ин-

формационных символов для ФРМ и восьми комбинаций для сигналов с ФМ. Этот случай характерен для границы зоны обслуживания двух станций, где информационные символы второго луча принимают случайные значения [9].

Интегральные функции ΔQ , приведенные на рис. 6 и 7 для условий распространения внутри зоны обслуживания и на границе, только определяют эффективность применения сигналов с ФРМ и ФМ, но не позволяют судить о помехоустойчивости при воздействии еще и аддитивной помехи.

На рис. 8 приведены кривые помехоустойчивости, построенные на основе интегральных функций ΔQ (рис. 6 и 7) с учетом действия аддитивной гауссовской помехи при когерентном приеме сигналов с ФРМ и ФМ.

Сильная зависимость ΔQ от задержки предопределяет проигрыш эффективности сигналов с ФРМ по сравнению с ФМ. Особенно это сказывается на границе зоны обслуживания двух станций, работающих на одной и той же несущей. Внутри зоны обслуживания проигрыш значительно меньше.

4. Заключение. Проведенный сравнительный анализ МСИ сигналов с ФМ и с ФРМ, выполненный на основе расчетов на ЭВМ, позволяет сделать следующие выводы:

— уникальность сигналов с ФМ заключается в том, что задержка второго луча лишь перераспределяет МСИ внутри интервала амплитуд дополнительного сигнала, а влияние фазы очень существенно;

— МСИ сигналов с ФРМ в двухлучевом канале в равной мере определяется как амплитудой, так и задержкой второго луча, фаза играет второстепенную роль;

— эффективность сигналов с ФРМ выше, чем сигналов с ФМ только при задержках менее 0,7 длительности посылки, при увеличении длительности посылки эффективность сигналов с ФМ выше;

— двухлучевая модель характерна для границы зон обслуживания двух станций, работающих на одной и той же несущей частоте, что позволяет рассчитать помехоустойчивость для заданной модели канала;

— представленный метод анализа МСИ позволяет сравнить эффективность применения разнесенного приема как на передаче, так и на приеме в многолучевых каналах связи.

Библиографический список

1. Кириллов Н. Е. Помехоустойчивая передача сообщений по линейным каналам со случайно изменяющимися параметрами: моногр. М.: Связь, 1971. 256 с.
2. Джейкса У. К. Связь с подвижными объектами в диапазоне СВЧ: пер. с англ. / под ред. М. С. Ярылкова, М. В. Чернякова. М.: Связь, 1979. 520 с.
3. Уильм К. Ли. Техника подвижных систем связи / пер. с англ. В. Н. Талызина; под ред. и с предисл. И. М. Пышкина. М.: Радио и связь, 1985. 292 с.
4. Белов А. С., Елесин М. Е. Расчет вероятности ошибки на бит в системах с многочастотными сигналами в двухлучевом канале с постоянными параметрами // Телекоммуникации. 2011. № 3. С. 22–32.
5. Белов А. С., Елесин М. Е. Анализ помехоустойчивости корреляционного приема сигналов в системах с многими несущими в условиях воздействия асинхронной структурной помехи // Телекоммуникации. 2013. № 2. С. 15–23.
6. Новые алгоритмы формирования и обработки сигналов в системах подвижной связи / Под ред. А. М. Шломы. М.: Горячая линия – Телеком, 2008. 344 с.
7. Сидельников Г. М., Сиянская А. С. Сравнительный анализ межсимвольной интерференции сигналов с ФРМ и ФМ в каналах с дискретной многолучевостью // Вестник СибГУТИ. 2013. № 4. С. 55–66.
8. Ожунев Ю. Б. Теория фазоразностной модуляции. М.: Связь, 1979. 216 с.
9. Сиянская А. С., Сидельников Г. М. Межсимвольная интерференция сигналов с ФРМ и ФМ в каналах с дискретной многолучевостью // Омский научный вестник. Сер. Приборы, машины и технологии. 2014. № 1 (127). С. 205–211.

СИДЕЛЬНИКОВ Геннадий Михайлович, кандидат технических наук, доцент кафедры «Радиотехнические системы».

МОРОЗОВ Сергей Александрович, студент гр. М-41 факультета «Мультисервисные телекоммуникационные системы».

СЛАСТУХИНА Виктория Игоревна, студентка гр. М-41 факультета «Мультисервисные телекоммуникационные системы».

Адрес для переписки: sid53@ngs.ru

Статья поступила в редакцию 25.01.2017 г.

© Г. М. Сидельников, С. А. Морозов, В. И. Сластухина

Книжная полка

Скляров, О. К. Волоконно-оптические сети и системы связи : учеб. пособие / О. К. Скляров. – 2-е изд., стер. – СПб. : Лань, 2016. – 260 с.

Рассмотрены основные протоколы, используемые в оптических сетях, вопросы тестирования систем, методы передачи информационных потоков. Большое внимание уделено аппаратуре цифровой иерархии, вопросам уплотнения, оптическим сетям доступа. Рассмотрены новые пассивные и активные элементы сетей, отечественные и зарубежные кабели. Освещены принципы работы оптических рамановских (ВКР) усилителей, электроабсорбционного модулятора света, широко используемого в современных высокоскоростных системах передачи. Учебное пособие предназначено для студентов технических вузов. Книга будет полезна также специалистам систем волоконно-оптической связи.

И. А. КИРОВСКАЯ
 А. В. ЮРЬЕВА
 С. Н. ПОГОДИН
 Р. В. ЭККЕРТ
 И. Ю. УМАНСКИЙ
 Е. Н. ЕРЕМИН
 Ю. И. МАТЯШ
 С. А. КОРНЕЕВ

Омский государственный
 технический университет,
 г. Омск

Омский государственный
 университет путей сообщения,
 г. Омск

ОСОБЕННОСТИ И ЗАКОНОМЕРНОСТИ В ИЗМЕНЕНИИ КИСЛОТНО- ОСНОВНОГО СОСТОЯНИЯ ПОВЕРХНОСТИ ПОЛУПРОВОДНИКОВ СИСТЕМ $A^{III}B^V$ -ZnSe-МАТЕРИАЛОВ ДЛЯ СЕНСОРОВ-ДАТЧИКОВ

С использованием комплекса методов изучены кислотно-основные свойства твердых растворов систем GaAs-ZnSe, InSb-ZnSe, в сравнении с исходными бинарными соединениями и между собой. Установлены природа, сила, неоднородный характер кислотных (активных) центров. Выявлены общие особенности и закономерности в изменении кислотно-основных свойств, в значительной мере обусловленные влиянием соединения $A^{III}B^V$ -ZnSe. Показана незавуалированно определяющая роль координационно-ненасыщенных атомов как активных центров адсорбции молекул типа H_2O , NH_3 . Полупроводники изученных систем с относительно кислой поверхностью ($pH_{\text{изо}} < 7$) рекомендованы в качестве материалов для сенсоров-датчиков на микропримеси основных газов (типа NH_3).

Ключевые слова: полупроводники, твердые растворы, кислотно-основные свойства, кислотные (активные) центры, закономерности, сенсоры-датчики.

Выбранными для исследований объектами явились бинарные компоненты и твердые растворы гетерозамещенных систем типа $A^{III}B^V$ - $A^{II}B^{VI}$ — GaAs-ZnSe и InSb-ZnSe, отличающихся бинарным компонентом $A^{III}B^V$. В них как катионообразователи, так и анионообразователи различной валентности и, соответственно, из разных групп периодической системы Д. И. Менделеева. Общим является природа межатомных связей (тетраэдрические ковалентные) и, как следствие, — идентичность кристаллических структур.

Многокомпонентность систем такого типа особенно ярко должна проявляться в поверхностных свойствах, исключительно важных при поиске новых материалов для микро-, оптоэлектроники и других областей современной техники, включая сенсорную технику. В этом и научном плане интерес также представляет влияние на свойства

многокомпонентных систем одного из бинарных компонентов типа $A^{III}B^V$ или $A^{II}B^{VI}$ (в данном случае типа $A^{III}B^V$).

Оценка высказанных прогнозов была дана на основе результатов выполненных исследований кислотно-основных свойств названных объектов.

Объекты исследований представляли собой порошки ($S_{\text{ya}} \leq 1,4 \text{ м}^2$) и пленки ($d = 20 - 100 \text{ нм}$) GaAs, InSb, ZnSe и твердых растворов $(\text{GaAs})_x(\text{ZnSe})_{1-x}$ ($x = 0,25; 0,50; 0,75 \text{ мол.}$), $(\text{InSb})_x(\text{ZnSe})_{1-x}$ ($x = 0,70; 0,85; 0,90; 0,95 \text{ мол.}$) Порошки твердых растворов получали методом изотермической диффузии (при 1473 и 1333 К соответственно), по специальной программе температурного нагрева [1], пленки твердых растворов и бинарных соединений — методом дискретного термического напыления в вакууме ($T_{\text{конд.}} = 298 \text{ К}$, $P = 1,33 \cdot 10^{-3} \text{ Па}$) на электродные площадки пьезокварцевых резонаторов АТ-среза [1, 2].

Для аттестации твердых растворов использовали в основном результаты рентгенографических исследований с привлечением результатов УФ-, ИК-спектроскопических и масс-спектрометрических исследований.

Рентгенографические исследования проводили на дифрактометре D8 Advance фирмы Bruker (Германия) с $\text{CuK}\alpha$ -излучением ($\lambda=0,15406$ нм, $T=293$ К) по методике большеугловых съемок [3, 4], при использовании позиционно-чувствительного детектора Lупхеуе, а также базы данных ICDDIPDF-2 и программы TOPAS 3,0 (Bruker).

УФ-спектры снимали на спектрометрах UV-2501 PC фирмы Shimadzu с приставкой диффузного отражения ISR-240A и SPECORD-40, в диапазоне 190–900 нм [5]; *ИК-спектры* (ИКС МНПВО) — на Фурье-спектрометре инфракрасном ИнфраЛюм ФМ-02 в спектральном диапазоне 830–4000 см^{-1} [1].

Кислотно-основные свойства поверхности изучали методами гидролитической адсорбции (определение pH изоэлектрического состояния поверхности — $\text{pH}_{\text{изо}}$), механохимии, неводного кондуктометрического титрования, адсорбции оснований и кислот из газовой фазы, термодесорбции.

При определении $\text{pH}_{\text{изо}}$ в роли адсорбентов-амфолитов выступали GaAs, InSb, ZnSe и твердые растворы $(\text{GaAs})_x(\text{ZnSe})_{1-x}$, $(\text{InSb})_x(\text{ZnSe})_{1-x}$ с характерными изоэлектрическими точками, отвечающими минимуму растворимости. Задача сводилась к нахождению pH среды, в которой адсорбенты-амфолиты отщепляют равные (очень малые) количества ионов H^+ и OH^- . По значениям $\text{pH}_{\text{изо}}$ оценивали среднюю силу и соотношение кислотных и основных центров.

При использовании механохимического метода появлялась возможность иметь дело со свежобразованной поверхностью и проследить за ее поведением в выбранной среде (воде) по изменению pH и продуктам взаимодействия таковой с поверхностными атомами полупроводника, контролируемым качественным химическим, УФ- и ИК-спектроскопическими анализами [6].

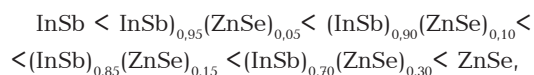
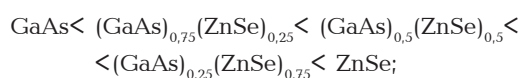
В методе неводного кондуктометрического титрования, использованного для оценки концентрации кислотных центров на поверхности и выявления их природы, измеряли электропроводность равновесной смеси (диспергированный адсорбент-полупроводник + растворитель (метилэтикетон)) при добавлении титранта (этилата калия). На основе построенных дифференциальных кривых за-

висимости удельной электропроводности от объема титранта рассчитывали концентрацию кислотных центров (для отдельных пиков и общую) по формуле:

$$C = V \cdot N \cdot 1000/m,$$

где V — объем раствора этилата калия, пошедшего на титрование, мл; N — нормальная концентрация раствора этилата калия, г-экв/л; m — масса адсорбента, г).

Адсорбционные измерения выполняли методами пьезокварцевого микровзвешивания и манометрическим в интервалах температур 273–623 К и давлений адсорбата 5,2–66,7 Па с привлечением масс-спектрометрической (в том числе лазерной) и хроматографической регистрации продуктов десорбции. По значениям pH изоэлектрического состояния исходных (экспонированных на воздухе) поверхностей (табл. 1) компоненты систем располагаются в ряды:



согласно которым наблюдается переход от слабокислых поверхностей через амфотерные к слабоосновным и, таким образом, уменьшение средней силы кислотных центров.

Для таких реальных поверхностей это можно объяснить различной степенью подвижности водорода в координационно-связанных с поверхностными атомами молекулах воды и OH^- -группах.

С уменьшением средней силы кислотных центров в указанных рядах коррелируют характеристики акцепторных свойств катионов — потенциалы ионизации ($I_{\text{Ga}} > I_{\text{Zn}}$; $I_{\text{In}} > I_{\text{Zn}}$), отношения зарядов к радиусам ($e/r = 4,8$ для Ga; 3,3 для In; 2,4 для Zn), а также теплоты адсорбции аммиака, рассчитанные по уравнениям Клапейрона–Клаузиуса и предложенному одним из авторов [7], характеризующих прочность связей «адсорбент–адсорбат». Их падение с ростом величины адсорбции — α свидетельствует об энергетической неоднородности поверхностей полупроводников — компонентов систем GaAs-ZnSe, InSb-ZnSe, то есть о присутствии на них

Таблица 1

Значения pH изоэлектрического состояния поверхностей ($\text{pH}_{\text{изо}}$) компонентов систем GaAs-ZnSe, InSb-ZnSe, экспонированных на воздухе

GaAs-ZnSe		InSb-ZnSe	
Состав	$\text{pH}_{\text{изо}}$	Состав	$\text{pH}_{\text{изо}}$
GaAs	6,4	InSb	6,3
$(\text{GaAs})_{0,75}(\text{ZnSe})_{0,25}$	6,8	$(\text{InSb})_{0,95}(\text{ZnSe})_{0,05}$	6,4
$(\text{GaAs})_{0,5}(\text{ZnSe})_{0,5}$	7,1	$(\text{InSb})_{0,90}(\text{ZnSe})_{0,10}$	6,6
$(\text{GaAs})_{0,25}(\text{ZnSe})_{0,75}$	7,5	$(\text{InSb})_{0,85}(\text{ZnSe})_{0,15}$	6,7
ZnSe	8,2	$(\text{InSb})_{0,70}(\text{ZnSe})_{0,30}$	6,9
		ZnSe	8,2

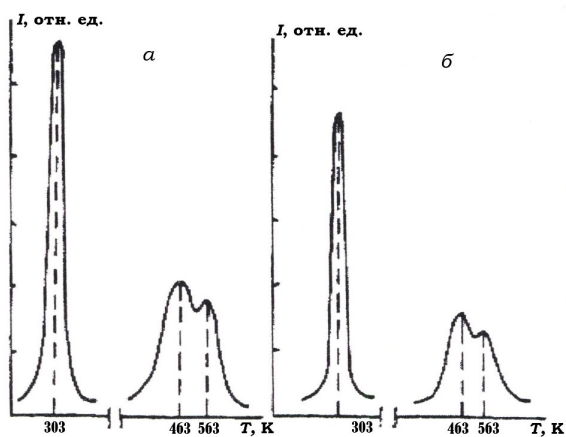


Рис. 1. Термохроматограммы термодесорбции NH_3 с поверхности: а — GaAs, б — ZnSe

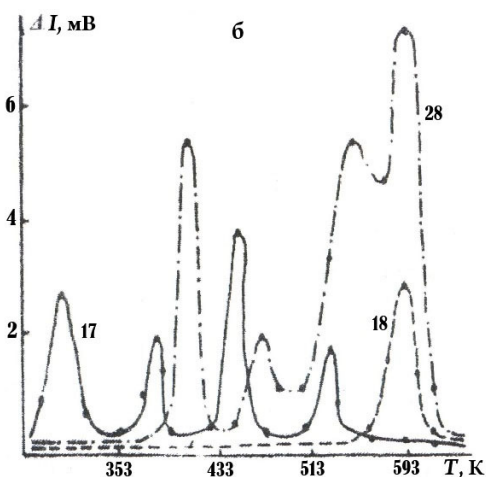
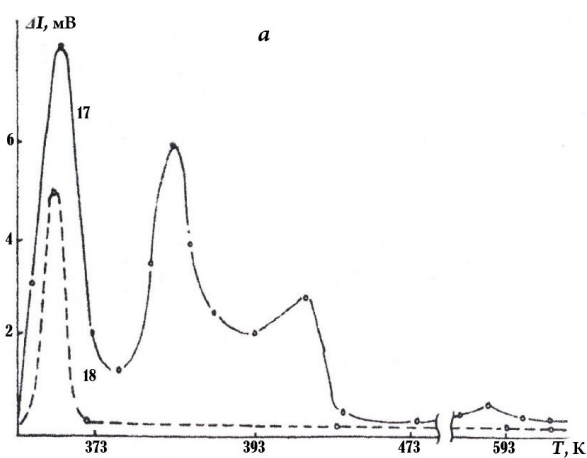


Рис. 2. Масс-спектры термодесорбции NH_3 с поверхности: а — GaAs, б — ZnSe

различных по силе кислотных центров. Такой факт подтверждают результаты неводного кондуктометрического титрования (наличие на дифференциальных кривых $\Delta\sigma/\Delta V - V$ двух-трех пиков) и результаты исследований термодесорбции аммиака, в частности, с поверхностями GaAs, ZnSe. Их термохроматограммы (рис. 1), содержащие по три пика (один — при температуре 303 К, другие два, менее разрешенные, — в интервалах 363–593 К на GaAs и 353–573 К на ZnSe) позволяют говорить

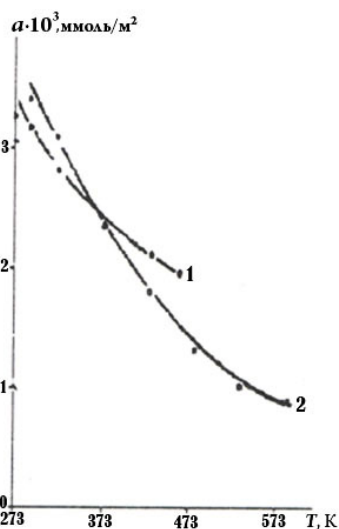


Рис. 3. Температурные зависимости величин адсорбции аммиака при $P = 61,3\text{--}66,7$ Па: GaAs (1), ZnSe (2)

о проявлении трех форм адсорбированного аммиака: непрочносвязанного (с участием ОН-групп и адсорбированных молекул воды) и двух форм координационно-связанного, отличающихся энергией активации десорбции. Этим адсорбционным формам соответствуют различные по силе кислотные центры на поверхностях исследуемых полупроводников.

Согласуются с термохроматограммами (рис. 1) масс-спектры продуктов термодесорбции аммиака (рис. 2), выявившие, по крайней мере, три адсорбционные формы. Как показал кинетический анализ, проведенный по приближенно-проинтегрированному уравнению Поляни–Вигнера, при температурах до 303 К термодесорбция протекает по первому порядку ($E_A = 8,4\text{--}21$ кДж/моль), при более высоких температурах — по второму порядку ($E_A = 63\text{--}67$ кДж/моль).

Очевидно, при низких температурах происходит взаимодействие аммиака с остаточными молекулами адсорбированной воды и группами ОН, а при высоких — с координационно-ненасыщенными поверхностными атомами. Причем высокотемпературные формы адсорбции сопровождаются диссоциацией, на что указывает присутствие $\text{CO} + \text{N}_2$ в масс-спектрах.

По интенсивности пиков термодесорбции, их смещению относительно температуры (при переходе от одного полупроводника к другому) можно судить о силе, концентрации кислотных центров и, таким образом, об адсорбционной активности, в частности, арсенида галлия и селенида цинка по отношению к аммиаку.

Такой же результат дают и прямые адсорбционные исследования.

Изобары адсорбции аммиака на изученных полупроводниках (рис. 3) имеют вид нисходящих кривых, указывая на преимущественно обратимый характер процесса. Однако при проведении его в прямом и обратном направлениях удалось выявить некоторый вклад необратимой химической адсорбции. В пользу этого говорят и величины теплот адсорбции NH_3 . Для рассматриваемых интервалов температур и заполнения они составляют 13–42 кДж/моль, что отвечает химической природе

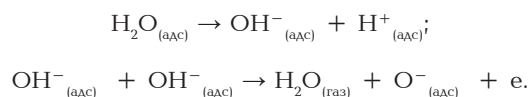
процесса в системах «газ—алмазоподобный полупроводник» [1].

Высказанные выше соображения об относительной силе кислотных центров компонентов названных систем находят подтверждение при сопоставлении величин адсорбции газообразных основания (NH_3) и кислоты (CO_2), в частности, на арсениде галлия и селениде цинка. Хотя величины адсорбции аммиака и на GaAs, и на ZnSe больше величин адсорбции CO_2 , однако из сравнения отношений $\alpha_{\text{NH}_3}/\alpha_{\text{CO}_2}$ для каждого из них следует: арсенид галлия обладает более «кислой» поверхностью, нежели селенид цинка.

При выяснении природы и силы кислотных центров, механизма кислотно-основных взаимодействий полезными оказались дополнительные сведения, полученные благодаря механохимическим исследованиям, позволяющим работать со свежесформированными поверхностями, прослеживать за их поведением и обнаруживать функциональные группы, не проявляющиеся на реальных (даже термоваккумированных) поверхностях. Так, при измельчении (диспергировании) монокристаллов и крупнодисперсных порошков GaAs, InSb, ZnSe в воде наблюдалось подкисление среды (уменьшается pH) и, соответственно, доказанное химическим, УФ-, ИК-спектроскопическими анализами присутствие в водных суспензиях ионов AsO_3^{3-} , AsO_4^{3-} , SbO_3^{3-} , SbO_4^{3-} и SeO_4^{2-} [6].

Как показано в [6], обнаруженные ионы имеют поверхностное происхождение, являясь продуктами взаимодействия воды с поверхностными атомами полупроводника по следующему механизму.

Химически адсорбированные молекулы воды (на их присутствие на реальной поверхности указали ИК-спектры) десорбируются по схеме:

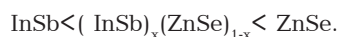
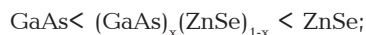


Частицы H^+ и O^- взаимодействуют с координационно-ненасыщенными атомами As, Sb, Se, находящимися на вновь созданной поверхности, с образованием кислот H_3AsO_4 , H_3SbO_4 , H_2SeO_4 , которые в процессе механохимического воздействия переходят в раствор.

Таким образом, благодаря механохимической активации поверхности практически «высвечивается» роль поверхностных, координационно-ненасыщенных атомов как активных центров и как ответственных за кислотность поверхности.

При анализе изученных кислотно-основных свойств полупроводников в пределах каждой рассмотренной системы, а также при сопоставлении в таковых обращают на себя внимание общие особенности и определенные закономерности.

По средней силе кислотных центров ($\text{pH}_{\text{нзо}}$) как в системе GaAs-ZnSe, так и в системе InSb-ZnSe полупроводники располагаются в одинаковой последовательности — в последовательности нарастания основности поверхности (роста $\text{pH}_{\text{нзо}}$) с увеличением содержания ZnSe:



При этом в указанных рядах кислотно-основные характеристики полупроводников $A^{\text{III}}B^{\text{V}}$ (GaAs, InSb)

и твердых растворов с одинаковым содержанием ZnSe близки и количественно.

К общим особенностям в поведении полупроводников систем следует отнести также одинаковую природу кислотных центров, ответственными за которые выступают координационно-ненасыщенные атомы, а также адсорбированные молекулы воды, группы OH^- , установленную (благодаря механохимическим и адсорбционным исследованиям) неувалярированно определяющую роль координационно-ненасыщенных атомов как активных центров адсорбции молекул типа H_2O , NH_3 .

Отмеченные закономерности в изменении кислотно-основных свойств полупроводников систем GaAs-ZnSe, InSb-ZnSe, как и их общность, можно объяснить значительным влиянием соединения $A^{\text{IV}}B^{\text{VI}}$ — селенида цинка.

В связи с этим целесообразно обратиться к некоторым, заслуживающим здесь внимание, объемным свойствам исходных бинарных полупроводников систем [1]. В частности, обращает на себя внимание следующая логическая нить: при переходе от InSb к ZnSe в ряду InSb, GaAs, ZnSe растут ширина запрещенной зоны (от 0,18 до 2,87 В), разность электроотрицательностей (от 0,1 до 0,8), соответственно, растут доля ионной связи, степень гидратации поверхности (присутствие групп OH^-) и, как следствие, основность поверхности ($\text{pH}_{\text{нзо}}$ от 6,3 (6,4) до 8,2).

На основе полученных результатов можно рекомендовать полупроводники изученных систем, обладающие относительно кислой поверхностью ($\text{pH}_{\text{нзо}} < 7$), в качестве материалов для сенсоров-датчиков на микропримеси основных газов (типа NH_3).

Библиографический список

1. Кировская И. А. Физико-химические свойства бинарных и многокомпонентных алмазоподобных полупроводников. Новосибирск: Изд-во СО РАН, 2015. 367 с.
2. Тонкие пленки антимида индия. Получение, свойства, применение / Под ред. В. А. Касьяна, П. И. Кетруша, Ю. А. Никольского [и др.]. Кишинев: Штиница, 1989. 162 с. ISBN 5-376-00071-0.
3. Горелик С. С., Расторгуев Л. Н., Скоков Ю. А. Рентгенографический и электронно-оптический анализ. М.: Металлургия, 1970. 107 с.
4. Смыслов Е. Ф. Экспрессный рентгеновский метод определения периода решетки монокристаллических материалов // Заводская лаборатория. Диагностика материалов. 2006. Т. 72, № 5. С. 33–35.
5. Косяченко А. А., Склярчук В. М., Склярчук О. В. Ширина запрещенной зоны кристаллов CdTe и $\text{Cd}_{0,9}\text{Zn}_{0,1}\text{Te}$ // Физика и техника полупроводников. 2011. Т. 45, № 10. С. 1323–1331.
6. Кировская И. А. Поверхностные явления. Омск: Изд-во ОмГТУ, 2001. 175 с.
7. Кировская И. А. Адсорбционные процессы. Иркутск: Изд-во ИГУ, 1995. 304 с.

КИРОВСКАЯ Ираида Алексеевна, доктор химических наук, профессор (Россия), руководитель научно-образовательного центра «Химические исследования» Омского государственного технического университета (ОмГТУ), заслуженный деятель науки и техники РФ.

ЮРЬЕВА Алла Владимировна, кандидат химических наук, доцент (Россия), доцент кафедры «Химическая технология и биотехнология» ОмГТУ.

ПОГОДИН Сергей Николаевич, аспирант кафедры «Химическая технология и биотехнология» ОмГТУ.
ЭККЕРТ Роберт Владимирович, аспирант кафедры «Химическая технология и биотехнология» ОмГТУ.
УМАНСКИЙ Илья Юрьевич, аспирант кафедры «Химическая технология и биотехнология» ОмГТУ.
ЕРЕМИН Евгений Николаевич, доктор технических наук, профессор (Россия), заведующий кафедрой «Машиностроение и материаловедение», декан машиностроительного института ОмГТУ.
МАТЯШ Юрий Иванович, доктор технических наук, профессор (Россия), профессор кафедры «Ва-

гоны и вагонное хозяйство» Омского государственного университета путей сообщения.

КОРНЕЕВ Сергей Александрович, доктор технических наук, профессор (Россия), профессор кафедры «Основы теории механики и автоматического управления» ОмГТУ.

Адрес для переписки: kirovskaya@omgtu.ru

Статья поступила в редакцию 09.03.2017 г.

© И. А. Кировская, А. В. Юрьева, С. Н. Погодин, Р. В. Эккерт, И. Ю. Уманский, Е. Н. Еремин, Ю. И. Матяш, С. А. Корнеев

Информация

Конкурс инновационных разработок молодых ученых и специалистов «Национальная научно-техническая конференция»

«Национальная научно-техническая конференция» является открытым конкурсом, в котором могут участвовать граждане РФ, желающие представить свои инновационные проекты в машиностроительной отрасли.

Основными целями «Национальной научно-технической конференции» являются:

- повышение престижа технических специальностей в машиностроительной отрасли;
- развитие творческого потенциала талантливой молодежи, привлечение ее к решению наиболее актуальных производственных, технических и экономических задач;
- внедрение в производство перспективных разработок молодых ученых и специалистов, имеющих практическое значение для дальнейшего развития промышленности России.

Задачи проекта:

- создание условий и возможностей для инновационной деятельности молодых специалистов;
- формирование у молодых машиностроителей мотивации к инновационной деятельности;
- выявление перспективных специалистов, способных формировать актуальные научно-технические предложения;
- выявление инновационных проектов с перспективой внедрения их в производственный процесс.

Участники проекта. Участниками конкурса, представляющими инновационные проекты, могут быть граждане РФ в возрасте до 35 лет включительно. Заявки могут быть как индивидуальными, так и коллективными, при этом возраст автора проекта и более 50 % ключевых участников на момент подачи заявки не должен превышать 35 лет.

Проект «Национальная научно-техническая конференция» проводится в три этапа:

1. Прием проектов. Для подачи проекта автору необходимо зарегистрироваться на портале конференции (www.nntk-smr.ru), далее через свой личный виртуальный профиль создать страницу проекта и заполнить анкету в соответствии с требованиями. Прием проектов **до 15 мая 2017 года**.

2. Экспертный отбор проектов. Отбор проектов формируется по отраслевому принципу:

- авиационная и ракетно-космическая промышленность;
- автомобильная промышленность;
- железнодорожное машиностроение;
- станкостроительная и инструментальная промышленность;
- приборостроение, системы управления, электронная и электротехническая промышленности;
- тракторное, сельскохозяйственное, лесозаготовительное, коммунальное и дорожно-строительное машиностроение;
- энергетическое машиностроение;
- оборонная промышленность;
- тяжелое машиностроение;
- судостроение;
- промышленная экология.

Оценка поданных на конкурс проектов осуществляется экспертным советом в соответствии с «Критериями по оценке работ».

Авторы проектов, прошедшие экспертный отбор, будут приглашены на Седьмой Международный молодежный промышленный форум «Инженеры будущего-2017» для защиты проекта перед экспертным советом.

3. Финал конференции. Участники конкурса, перешедшие на третий этап, получают приглашение на финальную конференцию МГТУ им. Баумана и проводят личную презентацию своих проектов экспертному совету и участникам конференции. По результатам проведенных презентаций экспертным советом определяются победители проекта. Награждение состоится в рамках ежегодной всероссийской конференции молодых ученых и специалистов «Будущее машиностроения России».

Подробная информация на сайте конференции: <http://nntk-smr.ru/about>

Источник: http://www.rsci.ru/grants/grant_news/284/239995.php (дата обращения: 27.03.2017).