

ЛАБОРАТОРНАЯ
ТЕХНИКА

УДК 681.586.5: 681.7.068.1

ИССЛЕДОВАНИЕ ВОЛОКОННО-ОПТИЧЕСКИХ ДАТЧИКОВ ТЕМПЕРАТУРЫ,
ИСПОЛЬЗУЮЩИХ AWG-СТРУКТУРЫ

©2026 г. А. Д. Бялик ^а*, А. С. Горин ^а, Д. С. Казанцев ^а,
Д. Б. Ямщиков ^а

^аНовосибирский государственный технический университет

Россия, 630073, Новосибирск, просп. К. Маркса, 20

*e-mail: BialikAleksandr@yandex.ru

Поступила в редакцию 07.08.2024 г.

После доработки 17.08.2024 г.

Принята к публикации 22.10.2024 г.

Рассматриваются волоконно-оптические датчики температуры на основе планарных AWG-мультиплексоров/демультиплексоров. Описан принцип действия таких датчиков, а также конструкция распределенных датчиков температуры и перепадов температуры. Экспериментально получены функции преобразования датчиков и проведена оценка их чувствительности. Предложено рассматривать в качестве выходного сигнала, характеризующего объект измерения, сочетание формы и абсолютных значений спектральной характеристики AWG-мультиплексоров/демультиплексоров.

Ключевые слова: волоконно-оптические датчики, планарные оптические схемы (PLC), AWG-мультиплексор/демультиплексор

1. ВВЕДЕНИЕ

Датчики физических величин на основе технологии микросистемной техники имеют длительную историю развития, однако поиск новых конструктивно-технологических решений продолжается и в настоящее время. Это вызвано, в первую очередь, все возрастающими требованиями к условиям работы датчиков.

В ряде случаев измерения становится возможным только при использовании более сложных схем преобразования измеряемых величин, например оптических датчиков. В таких

датчиках одним из основных элементов конструкции является оптическая проводящая среда, которая используется как в качестве чувствительного элемента, так и в качестве линии передачи [1–5].

Вместе с тем, некоторые недостатки (например чувствительность к факторам окружающей среды) конструктивных элементов, применяющихся, например, в технике связи, могут быть использованы для измерения различных физических величин.

Одним из возможных вариантов конструктивной реализации элементов датчиков физических величин с использованием технологий микросистемной техники является структура типа Arrayed Waveguide Gratings (AWG), используемая в технике связи в качестве мультиплексора или демультиплексора [6, 7]. Известно также, что такого рода структуры как элементы конструкции именно измерительных систем чаще всего применяются в спектрометрах, например таких, которые описаны в работах [8, 9].

Необходимо отметить, что в литературных источниках отсутствует достаточно полное описание преобразовательных характеристик как для волоконно-оптических датчиков (ВОД) в целом, содержащих элементы AWG, так и для распределенных датчиков в частности. Настоящая работа посвящена экспериментальному исследованию преобразовательных характеристик таких ВОД.

2. ПРИНЦИП ДЕЙСТВИЯ AWG-ДАТЧИКА ТЕМПЕРАТУРЫ

Структурная схема рассматриваемого датчика температуры представлена на рис. 1.

Рис. 1.Структурная схема AWG-датчика температуры

Принцип работы датчика основан на том, что оптическое излучение от источника (условно белый свет) попадает через оптическое волокно на вход демультиплексора, на котором, благодаря тому что составляющие излучения с разными длинами волн проходят разные оптические пути, происходит спектральное разделение исходного потока излучения. На выходе световой поток с разной длиной волн попадает в разные точки пространства, отклоняясь при этом на разные углы, что позволяет считывать излучение с разной длиной волн независимыми друг от друга фотоприемниками.

Оптическая длина пути L может быть определена как произведение геометрической длины пути d на эффективный показатель преломления среды n^* для данной длины волны:

$$L = d n^*. \quad (1)$$

Поскольку и геометрическая длина пути d и эффективный показатель преломления n^* в той или иной степени зависят от температуры, при изменении температуры чувствительного элемента изменяется и оптическая длина пути, причем для каждой из составляющих исходного спектра источника независимо от других составляющих. Это, в

свою очередь, приводит к перераспределению мощности излучения, падающего на фотоприемники, и, как следствие – к изменению электрического сигнала на выходе.

3. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ЧАСТЬ

Структурная схема установки для исследования AWG-датчика температуры показана на рис. 2.

Чувствительный элемент датчика располагался на массивной дюралюминиевой пластине размерами $200 \times 100 \times 6$ мм³. Для уменьшения теплопотерь пластина была покрыта теплоизоляционным материалом. Нагрев и охлаждение пластины осуществлялись при помощи двух элементов Пельтье (размеры 40×40 мм², мощность 50 Вт), размещенных так, как показано на рис. 2.

Рис. 2. Конструкция установки для исследования AWG-датчика температуры

На элементы Пельтье установлены радиаторы с вентиляторами для принудительного воздушного охлаждения. Использование элементов Пельтье обусловлено тем, что их можно применять как для охлаждения, так и для нагрева пластины. Контроль температур осуществлялся с помощью термопар. В качестве чувствительных элементов использовались стандартные, применяющиеся в технике оптической связи в качестве мультиплексоров/демультиплексоров (в нашем случае 44-канальные) AWG-элементы (структурная схема показана на рис. 3).

Рис. 3. Структурная схема AWG-демультиплексора как чувствительного элемента датчика температуры

В нашем случае конструктивно они представляли собой пластины, выполненные из монокристаллического кремния. На рабочей стороне таких пластин осажден относительно толстый слой SiO_2 , играющий роль оболочки оптического волновода, показатель преломления которой равен n_2 , в котором путем добавления GeO_2 изготовлены области, играющие роль сердцевины оптического волновода, их показатель преломления равен n_1 , причем $n_1 > n_2$. Размер пластины AWG (длина \times ширина \times толщина) составляет $30 \times 20 \times 1$ мм³.

В качестве источника оптического излучения использовался лазерный источник с рабочими длинами волн 1310 и 1550 нм (± 20 нм). Источник оптического излучения помещался в терmostатированный корпус, в котором поддерживалась постоянная температура. В качестве фотоприемников и приборов для усиления и индикации выходного сигнала использовались измерители оптической мощности с динамическим диапазоном от -70 до $+6$ дБ, рабочим диапазоном длины волны 800–1700 нм и погрешностью 5%.

Выходной сигнал представлял собой набор из нескольких значений измеренной мощности на разных выходных каналах демультиплексора, соответствующих разной длине волны. В табл. 1 указаны использованные оптические каналы с длиной волны, соответствующей минимальному затуханию в этих каналах.

Таблица 1. Оптические каналы

Номер оптического канала	39	41	42	43	44	46
Длина волны λ , нм	1546.12	1544.52	1543.73	1542.93	1542.14	1540.55

Мы провели несколько серий экспериментов, в ходе которых температура дюралюминиевой пластины, а также температурные градиенты устанавливались несколькими различными способами. В исходном состоянии перед началом нагрева и/или охлаждения температура пластины была постоянной по всей площади пластины, она предварительно фиксировалась в трех точках и принималась за начальную.

3.1. Первая серия измерений

Дюралюминиевая пластина нагревалась равномерно по всей площади от $T_1 = 15$ °С до $T_2 = 55$ °С. Контроль температуры осуществлялся в трех точках вдоль длинной оси пластины, причем режим нагрева (ток и напряжение питания элементов Пельтье) был подобран таким образом, чтобы не допустить температурных перепадов по площади пластины. Типичные результаты показаны на рис. 4.

Рис. 4. Зависимость выходного сигнала от температуры

3.2. Вторая серия измерений

Кремниевый чувствительный элемент с AWG-структурой закреплялся на дюралюминиевой пластине в ее центре двумя способами: 1) перпендикулярно длинной стороне пластины, 2) с поворотом на 45° вокруг вертикальной оси относительно длинной стороны пластины. Исходная температура дюралюминиевой пластины была установлена равной 22 °С. Изменения температуры пластины проводились по следующей методике.

Край А дюралюминиевой пластины нагревался до температуры 60 °С, после достижения которой нагрев прекращался, а край В охлаждался до температуры 17 °С. Данная процедура повторялась циклически 3–5 раз. Типичные результаты показаны на рис. 5, 6.

Рис. 5. Зависимость выходного сигнала от перепадов температуры.

Рис. 6. Зависимость выходного сигнала от перепадов температуры

Была проведена оценка чувствительности функции преобразования рассматриваемого датчика. Оценка проводилась согласно следующему выражению для температурного диапазона 15–55 °C [10]:

$$S_j = \sum_{i=1}^n (P_{j+1} - P_j)_i^2, \quad (2)$$

где n – общее число каналов, на которых проводились измерения, каждый из каналов характеризуется определенной длиной волны оптического излучения, i – текущий номер канала, P – мощность оптического излучения, j – текущая измеряемая температура, j изменяется от 1 до $m-1$, где m – общее число заданных в ходе эксперимента температур. Значения чувствительности, достигнутые в ходе экспериментов, находятся в интервале $7 \cdot 10^{-12} - 7 \cdot 10^{-14}$ Вт²/°C.

4. ЗАКЛЮЧИТЕЛЬНЫЕ ЗАМЕЧАНИЯ

Анализируя результаты экспериментов, можно отметить следующее.

1. Исследования датчиков, использующих в качестве чувствительных элементов AWG-демультиплексоры, показали принципиальную возможность разработки и применения таких приборов.

2. Полученные значения мощности выходного оптического сигнала для волн разной длины принадлежат спектральной характеристике выходного сигнала демультиплексора, общий вид которого является функцией температуры.

3. Полученные зависимости изменений мощности оптического сигнала для волн разной длины не зависят друг от друга.

4. Выходной сигнал зависит от ориентации чувствительного элемента относительно градиента температур.

Исходя из этого, можно сделать вывод, что такой датчик можно использовать как элемент распределенной оптической измерительной системы, причем в качестве выходного сигнала, характеризующего объект измерения, может рассматриваться сочетание абсолютных значений и формы спектральной характеристики AWG-демультиплексора.

Поскольку оптическая часть датчика, в том числе и вследствие принципа своего функционирования, занимает относительно большую площадь (минимальные размеры кратны длине волны источника излучения), приведенная в работе конструкция может быть использована как датчик перепадов температуры на некоторой площади и/или в объеме. При этом максимальный размер площади или объема чувствительного элемента будет

ограничен только возможностями технологических процессов производства планарных оптических схем.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Клаассен К.* Основы измерений. Датчики и электронные приборы. Долгопрудный: Интеллект, 2012.
2. *Бусурин В.И., Носов Ю.Р.* Волоконно-оптические датчики: физические основы расчета и применения. Москва: Энергоатомиздат, 1990.
3. *Vaganov V.I.* // Sens. actuators A. 1991. V. 28. P. 161.
[https://doi.org/10.1016/0924-4247\(91\)85002-6](https://doi.org/10.1016/0924-4247(91)85002-6)
4. *Окоси, Т., Окамото К., Оцу М., Нисихара Х., Кюма К., Хататэ К.* Волоконно-оптические датчики. Ленинград: Энергоатомиздат, 1990.
5. *Бялик А.Д.* Разработка и исследование амплитудных волоконно-оптических датчиков давления. Дисс. ... канд. техн. наук. ОмГТУ, Омск, 2009. 169 с.
6. *Гончаров А.А., Светиков В.В., Свидзинский К.К., Сычугов В.А., Усевич Б.А.* // Квантовая электроника. 2004. Т. 34. № 8. С. 755.
7. *Seyringer D.* Arrayed Waveguide Gratings. Washington: SPIE Press P.O., 2016.
<https://doi.org/10.1117/3.2242852>
8. *Yeboa N.A., Bogaerts W., Hensb Z., Baetsa R.* // Proc. of SPIE. 2012. V. 8264. P. 82640.
<https://doi.org/10.1117/12.907301>
9. *Xueping Wang, Chun-Liu Zhao, Jihui Li, Yongxing Jin, Shangzhong Jin.* // Rev. Sci. Instrum. 2013. V. 84. P. 043114. <https://doi.org/10.1063/1.4803005>
10. *Ван Трис Г.* Теория обнаружения, оценок и модуляции. Москва: Советское радио, 1972.

ПОДПИСИ К РИСУНКАМ

Рис. 1. Структурная схема AWG-датчика температуры: 1 – источник оптического излучения, 2а и 2б – кварцевые оптические волокна, 3 – оптический AWG-мультиплексор/демультиплексор в качестве чувствительного элемента, 4 – набор фотоприемников, 5 – многоканальный усилитель сигналов с фотоприемников.

Рис. 2. Конструкция установки для исследования AWG-датчика температуры: 1 – дюралюминиевая пластина, 2 – элементы Пельтье, 3 – радиаторы, 4 – вентиляторы, 5 – чувствительный элемент датчика (кремниевая пластина с AWG-мультиплексором/демультиплексором), 6 – опорные элементы, 7 – области размещения контрольных термопар. Для удобства описания эксперимента края пластины обозначены буквами А и В. Источник, приемники оптического излучения и оптические волокна на схеме не показаны.

Рис. 3. Структурная схема AWG-демультиплексора как чувствительного элемента датчика температуры: 1 – $\text{SiO}_2\text{--GeO}_2$, 2 – SiO_2 , 3 – подложка из монокристаллического кремния, 4 – канальные волноводы, 5 – входной разветвитель, 6 – выходной разветвитель, 7 – входное кварцевое волокно, 8 – выходные кварцевые волокна.

Рис. 4. Зависимость выходного сигнала от температуры.

Рис. 5. Зависимость выходного сигнала от перепадов температуры. По оси x отложены значения температур в области закрепления кремниевой пластины с AWG-демультиплексором (в центре дюралюминиевой пластины).

Рис. 6. Зависимость выходного сигнала от перепадов температуры (зависимости приведены для одного канала как типичные). Обозначения те же, что и на рис. 5: 1 – чувствительный элемент с AWG-структурой закреплялся перпендикулярно длинной стороне пластины, 2 – с поворотом на 45° вокруг вертикальной оси относительно длинной стороны пластины.

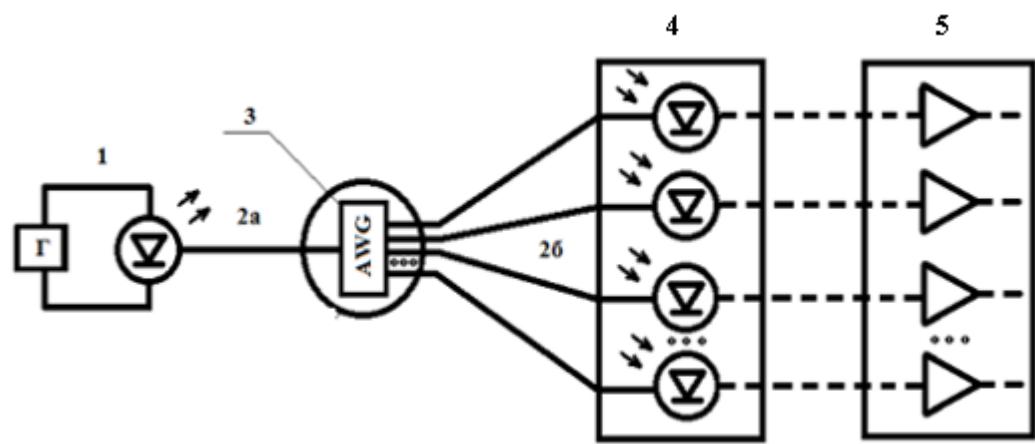


Рис. 1.

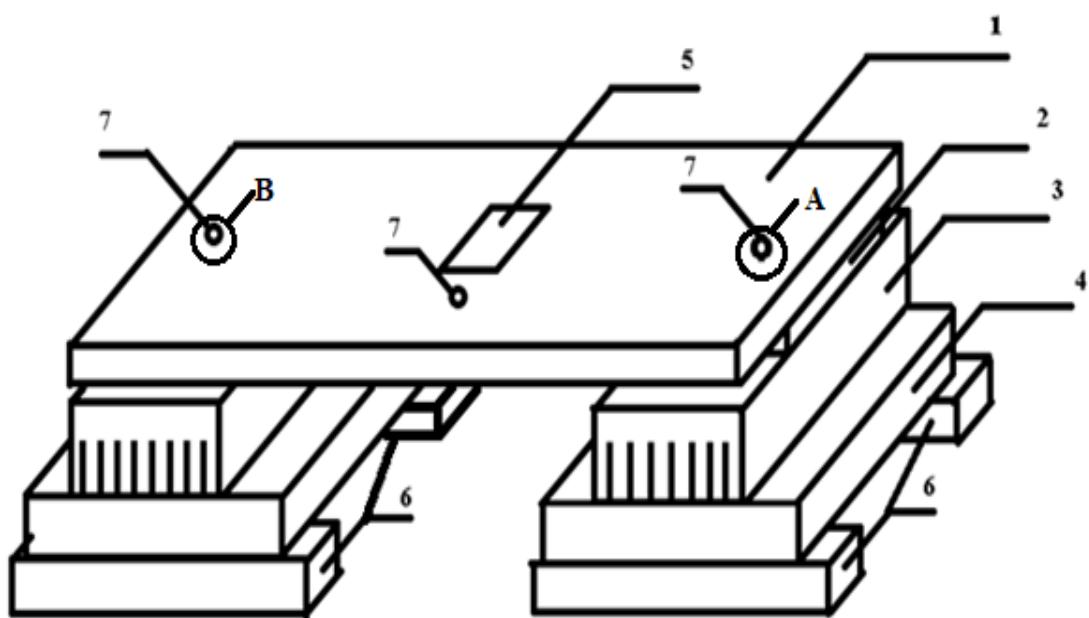


Рис. 2.

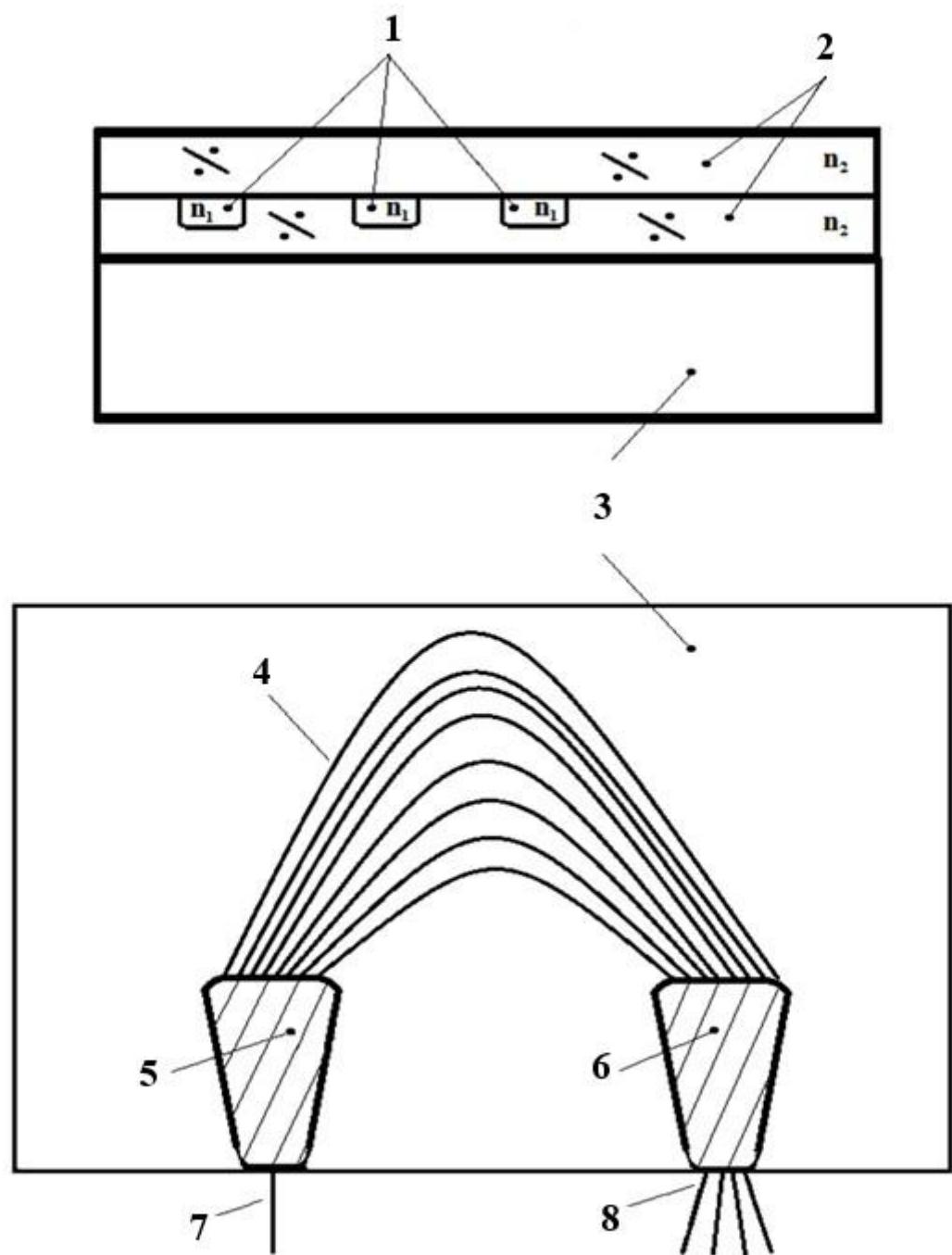
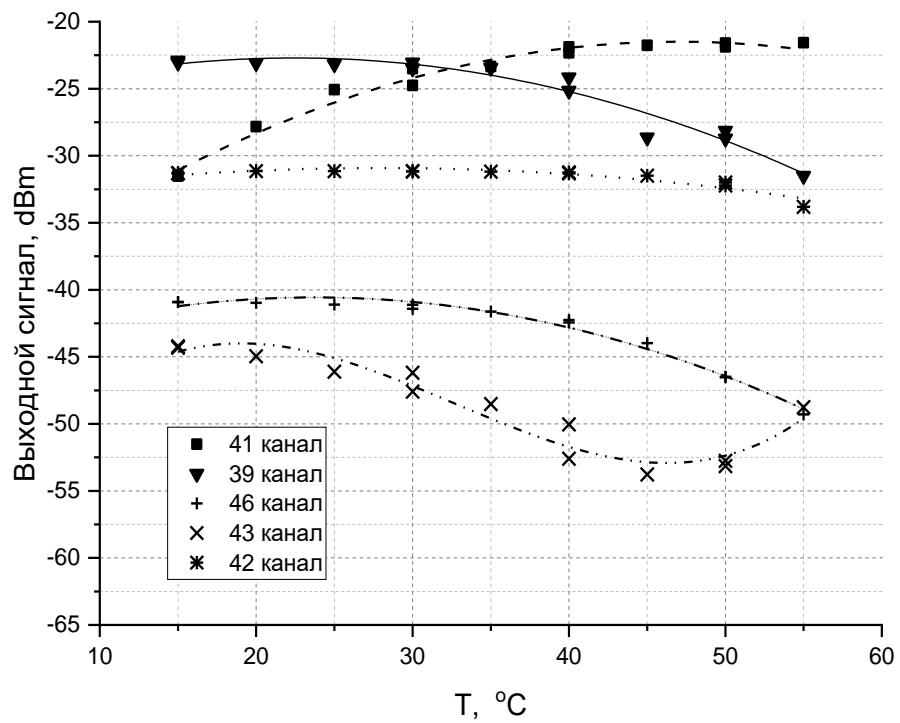


Рис. 3.



Р и с. 4.

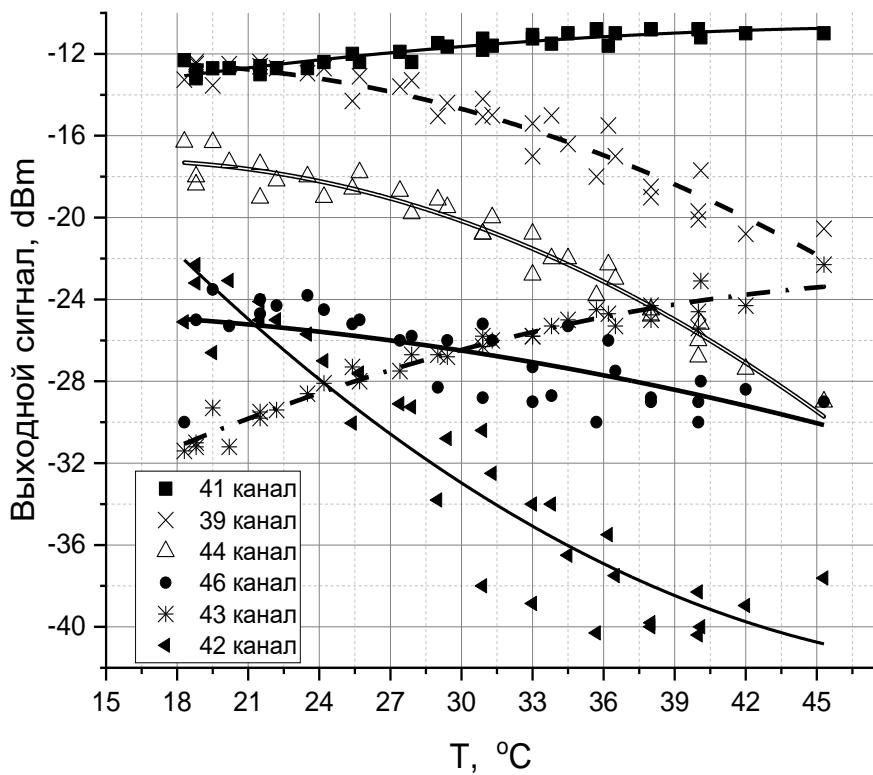


Рис. 5.

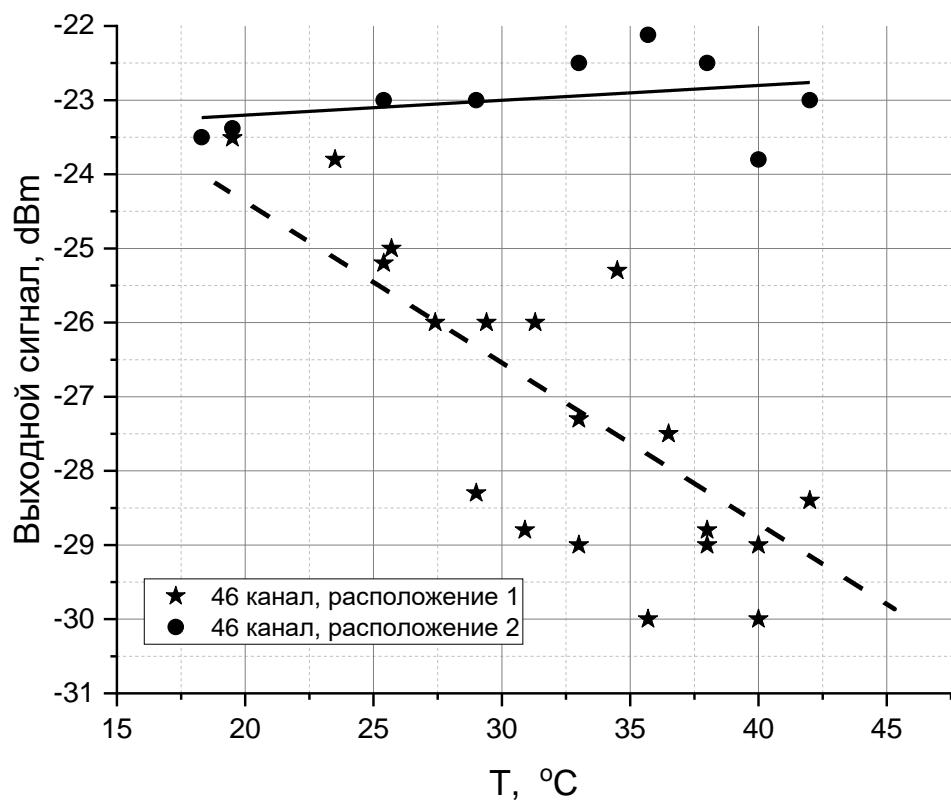


Рис. 6.