

РАЗВИТИЕ ПРИНЦИПОВ ПОСТРОЕНИЯ ПЕРЕМЕННЫХ ОПТИКО-ЭЛЕКТРОННЫХ АТТЕНЮАТОРОВ

В.Н. Гаврилов, Ю.М. Грязнов, к.ф.-м.н.,
С.А. Моисеев, к.т.н., А.А. Частов, к.ф.-м.н.,
ФГУП "ННИПИ "Кварц",
Нижний Новгород, www.kvarz.com

Волоконно-оптические attenuators предназначены для уменьшения мощности излучения в оптическом диапазоне без его искажения. Эти устройства применяются в различных сетях передачи данных и в контрольно-измерительных приборах. Конструкция attenuators меняется по ходу развития методов измерений характеристик излучения. В статье представлена информация о методиках снижения погрешности ослабления излучения в оптическом диапазоне.

ВВЕДЕНИЕ

Возникновение волоконной оптики, обусловленное, в частности, созданием когерентных источников света, привело к необходимости разработки измерительной техники, которая сможет функционировать аналогично приборам, работающим в радиодиапазоне. Речь идет о генераторах, attenuators, ваттметрах и других устройствах, предназначенных для работы с излучением оптического диапазона.

Attenuators используются для изменения уровня светового потока перед регистрирующим прибором [1,2], измерения чувствительности оптико-электронных приборов и улучшения работы приемников (например, перевод детектора на линейный участок характеристики [3]). Отмечаются следующие принципы ослабления света: использование расходимости пучка излучения, фотометрические сетки, диафрагмы, вращающийся диск с чередованием секторов различной прозрачности, рассеивающие или поглощающие среды, комбинации линз и диафрагм, многократное френелевское отражение.

В данной работе описываются особенности конструкции и функциональные возможно-

DEVELOPMENT OF CONSTRUCTION PRINCIPLES OF VARIABLE OPTOELECTRONIC ATTENUATORS

V.N.Gavrilov, Yu.M.Griaznov, Ph.D. (Physics and Mathematics), S.A.Moiseev Ph.D. (Engineering),
A.A.Chastov, Ph.D. (Physics and Mathematics)
FSUE "Nizhny Novgorod Research Instrument Engineering Institute "Kvarz" Nizhny Novgorod,
www.kvarz.com

Fiber optic attenuators are intended for the reduction of radiation power within optical range without its distortion. These devices are used in various data communication networks and control and measuring instruments. Construction of attenuators varies in the course of development of measurement methods of radiation characteristics. Information on the methods of reduction of radiation attenuation error within optical range is given below.

INTRODUCTION

Occurrence of fiber optics, which is stipulated by the creation of coherent light sources, in particular, resulted in the necessity of development of measuring instruments capable to function similarly to the instruments operating within radio-frequency band. It is referred to the generators, attenuators, watt-meters and other devices intended for the operation with radiation within optical range.

Attenuators are used for the variation of light flux level before recording device [1], measurement of sensitivity of optoelectronic devices and improvement of detector operation. For example, detector transmission to linear characteristic sector [2]. The following principles of light attenuation are observed: use of radiation beam divergence, photometric grids, diaphragms, rotating disk with the alteration of sectors with different transparency, scattering or absorbing media, combinations of lenses and diaphragms, multiple Fresnel reflection.

In this paper, the peculiarities of construction, functional capabilities of fiber optic attenuators produced by NRIEI "Kvarz" and methods of their improvement are described.

сти волоконно-оптических attenuators производства ННИПИ "Кварц", а также методы их усовершенствования.

КОНСТРУКТИВНЫЕ ОСОБЕННОСТИ И ФУНКЦИОНАЛЬНЫЕ ВОЗМОЖНОСТИ ВОЛОКОННО-ОПТИЧЕСКИХ АТТЕНЮАТОРОВ

При переходе к волоконной оптике цели и принципы ослабления излучения остаются без изменения. Однако конструктивное исполнение attenuators осложняется тем, что в большинстве случаев на их входе и выходе стоят волоконные соединители. Для определенности под ослабителями далее мы будем понимать элемент, в котором непосредственно происходит поглощение излучения, а под attenuatorом – устройство, в которое входит названный элемент с согласующими и механическими узлами.

Волоконно-оптические attenuators можно классифицировать по различным признакам.

Один из таких признаков – характер ослабления излучения. Существуют модели attenuators, которые могут уменьшать интенсивность излучения на фиксированную величину. В некоторых устройствах реализовано переключение дискретных значений ослабления. Часть attenuators разработаны для непрерывного изменения интенсивности. Кроме того, существуют модификации, в которых сочетается ступенчатая и плавная регулировка ослабления света.

Исходя из назначения, attenuators могут встраиваться в измерительные модули или выпускаться как самостоятельные изделия.

По методу внесения потерь attenuators подразделяются на последовательные и параллельные. В первом случае происходит последовательное переключение нескольких элементов с различными значениями ослабления. Во втором – одновременное включение нескольких элементов с различными величинами ослабления.

Управление attenuators может быть как механическим, так и программным.

Разработка волоконно-оптических attenuators в ННИПИ "Кварц" началась в 80-х годах прошлого столетия. При создании первых отечественных волоконно-оптических генераторов ОГ4-162 и ОГ4-163 возникла необходимость включения в них attenuators с переменным значением ослабления [4]. Ослабление оптического излучения осуществлялось за счет дифракционных потерь при передаче излучения между

STRUCTURAL PECULIARITIES AND FUNCTIONAL CAPABILITIES OF FIBER OPTIC ATTENUATORS

When transiting to fiber optics, the objectives and principles of radiation attenuation remain the same; however, the structural design of attenuators becomes more complex due to the fact that in most cases the fiber couplers are present at their entry and exit. To be more definite, hereinafter the dampers mean elements, in which the radiation absorption takes place, and attenuator is the device, in which this element is placed with matching and mechanical units.

Fiber optic attenuators can be classified on the basis of different features.

One of such features consists in the character of radiation attenuation. There are models of attenuators which can reduce the radiation intensity by fixed value. The switch of discrete values of attenuation is implemented in some devices. Some attenuators are developed for continuous variation of intensity. In addition, there are modifications, in which step and smooth adjustments of light attenuation are combined.

Based on the intended purpose, attenuators can be built into more complex units or produced as independent items.

Based on the method of loss introduction, attenuators are divided into sequential and concurrent attenuators. In the first case, the sequential switch of several elements with different values of attenuation takes place. In the second case, there is simultaneous switching-on of several elements with different values of attenuation.

Attenuator control can be mechanical and programmable.

Development of fiber optic attenuators at NRIEI "Kvarz" started in the 80s of last century. When creating the first domestic fiber optic generators OG4-162 and OG4-163, the necessity of inclusion of attenuator with variable attenuation value into them occurred [3]. Attenuation of optical radiation was performed at the expense of diffraction losses during the radiation transmission between the ends of optically connected light guides. Change of attenuation value within the range 0-25 dB was performed by the variation of distance L between the ends of light guides (Fig. 1). At the same time, during the adjustment of attenuation value the resolution was not worse than 0.1 dB, error was not less than 0.5 dB, and initial losses did not exceed 0.8 dB.

Structurally the attenuator consists of the guide, in which the heads with accurately centered light

торцами оптически связанных световодов. Изменение значения ослабления излучения 2 (рис.1) в диапазоне 0–25 дБ производилось путем варьирования расстояния L между торцами световодов 1 и 3. При этом разрешение при установке значения ослабления было не хуже 0,1 дБ, погрешность – менее 0,5 дБ, начальные потери не превышали 0,8 дБ.

Конструктивно аттенюатор состоит из направляющей, в которой расположены наконечники с точно центрированными световодами. Установка необходимого значения ослабления производится ручкой, связанной с механизмом перемещения одного из наконечников и отсчетным устройством (рис.2).

Более высокой воспроизводимости параметров ослабления можно достичь двумя методами: при работе с параллельными пучками или путем разрыва волоконно-оптического тракта и установки на его входе и выходе линзовых согласующих элементов. Микролинзы согласующих элементов юстируются относительно торцов волокна и друг друга по минимальному значению начальных вносимых потерь. Точность установки торца волокна должна быть не хуже 0,5 мкм в поперечном сечении и 5 мкм – в продольном.

Ослабление оптического излучения достигается путем введения в параллельный пучок одного или нескольких дискретных ослабителей (рис.3).

Ослабление на длине волны излучения при вводе в канал n ослабителей составляет

$$A(\text{дБ}) = 10 \lg \left[\prod_{i=1}^n \rho_i(\lambda) \exp(-k(\lambda) \sum_{i=1}^n L_i) \right], \quad (1)$$

где n – число включенных дискретных ослабителей,

$\rho_i(\lambda)$ – отражение от поверхности i -го поглотителя,

L_i – толщина i -го поглотителя.

Точная величина ослабления достигается посредством введения переменного ослабителя, который изменяет интенсивность излучения путем варьирования угла поворота диска с нанесенным поглотителем:

$$A(\text{дБ}) = \rho_{\text{пер}}(\alpha, \lambda) \exp(-k(\lambda) f(\alpha)) + 10 \lg \left[\prod_{i=1}^n \rho_i(\lambda) \exp(-k(\lambda) \sum_{i=1}^n L_i) \right], \quad (2)$$

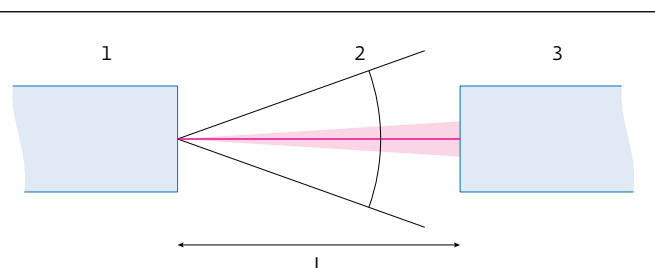


Рис.1. Оптическая схема аттенюатора

Fig. 1. Optical layout of attenuator

guides are located. Regulation of required value of attenuation is performed by the handle connected with displacement mechanism of one of the heads and indicating device (Fig. 2).

The best reproducibility of attenuation parameters can be achieved on the basis of operation with parallel beams and via the interruption of fiber optic path and installation of lens matching elements at its entry and exit. Microlenses of matching elements are adjusted relatively to fiber ends and each other by minimum value of initial introduced losses. The accuracy of installation of fiber end must not be worse than 0.5 μm in cross-section and 5 μm in longitudinal section.

Attenuation of optical radiation is achieved by the introduction of one or several discrete dampers (Fig. 3).

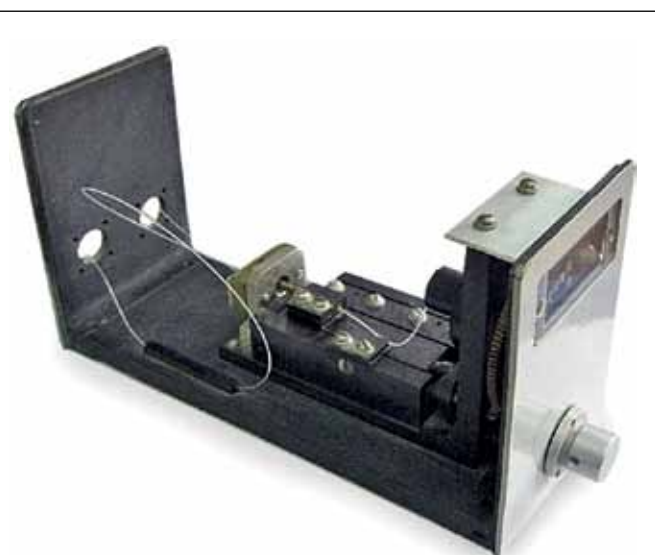


Рис.2. Аттенюатор с плавным изменением величины ослабления

Fig. 2. Attenuator with smooth variation of attenuation value

где α – угол поворота диска,

$f(\alpha)$ – зависимость толщины пленки от угла поворота,

$\rho_{\text{пер}}(\alpha, \lambda)$ – коэффициент уменьшения интенсивности излучения для плавного ослабителя, определяемый как отношение интенсивности излучения после ослабителя к интенсивности излучения до ослабителя.

Встраиваемый аттенюатор с методом вне-сечения потерь последовательного типа показан на рис.4. Пять дискретных ослабителей с фиксированными значениями ослабления от 1 до 30 дБ расположены на диске и при его вращении могут последовательно вводиться в оптический канал. Диск связан с ручкой управления системой шестерен. Он расположен между входным и выходным согласующими элементами. Рабочие длины волн составляют 0,85; 1,3; 1,55 мкм.

Встраиваемые аттенюаторы интегрируются и в волоконно-оптические генераторы ОГ4-181 и ОГ4-182 [5]. В оптических блоках этих генераторов сформирован канал с параллельным пучком излучения, в котором последовательно расположены: ответвитель, плавный аттенюатор, дополнительный ответвитель, дискретные аттенюаторы с затуханием 20 и 40 дБ, вводимые в канал с помощью реле. Регистрация сигналов с ответвителей с помощью фотодиодов позволяет контролировать мощность излучения на входе и после плавного ослабителя. Кроме того, внедрение в конструкцию переключателя приводит к возможности полностью перекрывать параллельный пучок.

Все разработанные аттенюаторы, кроме моделей, встроенных в генераторы ОГ4-162 и ОГ4-163, построены на основе внесения потерь в параллельный пучок между двумя согласующими узлами. Используется как последователь-

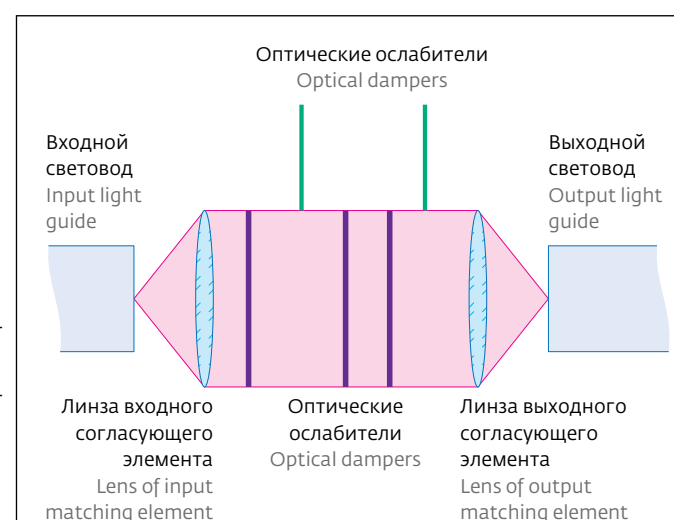


Рис.3. Оптическая схема аттенюатора

Fig. 3 Optical layout of attenuator

Attenuation at the radiation wavelength at the entry to channel n of reducers is equal to

$$A(\text{дБ}) = 10 \lg \left[\prod_{i=1}^n \rho_i(\lambda) \exp(-k(\lambda) \sum_{i=1}^n L_i) \right], \quad (1)$$

where n is the number of introduced discrete dampers,

$\rho_i(\lambda)$ is the reflection from surface of i^{th} absorber,

L_i is the thickness of i^{th} absorber.

The accurate value of attenuation is achieved by the introduction of variable damper, which changes radiation intensity through the variation of rotation angle of disk with applied absorber.

$$A(\text{дБ}) = \rho_{\text{пер}}(\alpha, \lambda) \exp(-k(\lambda) f(\alpha)) + 10 \lg \left[\prod_{i=1}^n \rho_i(\lambda) \exp(-k(\lambda) \sum_{i=1}^n L_i) \right], \quad (2)$$



Рис.4. Attenuator of sequential type with stage variation of attenuation value
Fig. 4. Attenuator of sequential type with stage variation of attenuation value



Рис.5. Attenuator of parallel type with stage variation of attenuation value
Fig. 5. Attenuator of parallel type with stage variation of attenuation value

ный, так и параллельный способы внесения потерь. Преимуществом параллельного способа, который реализован во всех программируемых аттенюаторах, является возможность достижения предельных величин ослабления при сравнительно небольших характеристиках ослабления составляющих элементов. К недостаткам следует отнести повышение начальных потерь из-за увеличения расстояния между согласующими элементами.

В НИИПИ "Кварц" разработана линейка аттенюаторов, представляющих собой самостоятельные устройства, обеспечивающие различную степень ослабления. Среди них можно выделить аттенюатор с параллельным способом введения ослабления (рис.5), состоящий из соосно расположенных ослабителей с заданными значениями затухания. Прибор позволяет использовать любую комбинацию ослабителей в диапазоне 0–80 дБ с шагом 3–4 дБ.

В аттенюаторе, показанном на рис.6, реализован комбинированный способ внесения потерь. Дискретные элементы с заданными значениями ослабления от 3 до 30 дБ установлены на диске и поочередно вводятся в пучок излучения. Последовательно с диском, где расположены дискретные ослабители, помещен диск плавного ослабителя, при повороте которого изменяется поглощение излучения от 0 до 20 дБ. Эти два диска связаны с ручками управления системой шестеренок. В окне на передней панели аттенюатора расположены лимбы, проградуированные в единицах дБ.

where α is the disk rotation angle,
 $f(\alpha)$ is the dependence of film thickness on rotation angle,
 $\rho_{\text{пер}}(\alpha, \lambda)$ is the coefficient of decrease of radiation intensity for smooth damper determined by the reflection on surface with applied absorber.

Built-in attenuator with the method of loss introduction of sequential type is shown in Fig. 4. Five discrete dampers with fixed values of attenuation from 1 to 30 dB are located on the disk and upon its rotation they can be sequentially introduced into optical channel. The disk is connected with control knob by the train of gears. It is located between the entry and exit matching elements. Operating wavelengths are 0.85; 1.3; 1.55 μm .

Built-in attenuators can be integrated into fiber optic generators OG4-181 and OG4-182 as well [4]. The channel with parallel radiation beam is formed in optical blocks of these generators; this channel contains the following components located sequentially: coupler, smooth attenuator, additional coupler, discrete attenuators with the attenuation of 20 and 40 dB introduced into the channel with the help of relay. Signal recording from the couplers using photodiodes allow controlling the radiation power at the entry and after smooth damper. In addition, the introduction of switch into the structure results in the capability to cut off the parallel beam completely.

All developed attenuators, except for the models built into the generators OG4-162 and OG4-163, are constructed on the basis of loss introduction into

Кроме дисков в пучок излучения в области задней панели с помощью электродвигателя вводится пластина, имеющая три положения: открыто, закрыто и дополнительный ослабитель с затуханием в 20 или 30 дБ. Общий диапазон изменения значения ослабления составляет от 0 до 80 дБ. Специально разработанные согласующие узлы устроены так, что излучение посредством использования микролинз фокусируется на торцы внешних соединителей, подключаемых к аттенюатору. Была разработана модификация аттенюатора, у которого на входе и выходе установлены стандартные розетки, связанные с согласующими узлами с помощью внутренних стандартных соединителей (рис.7).

Наиболее технологическим методом изготовления ослабителей является напыление металлической пленки на прозрачную подложку. Основное требование, предъявляемое к материалу покрытия – минимальная зависимость коэффициента ослабления от длины волны. Этому аспекту в наибольшей степени удовлетворяют пленки из титана и никеля. Наименьшей селективностью обладают пленки из никеля, однако они характеризуются низкой адгезией к стеклу. Поэтому для ослабителей более подходят пленки на основе титана.

Кроме поглощающих покрытий в изготовлении аттенюаторов используются специально разработанные просветляющие покрытия ($\text{MgF}_2\text{-Al}_2\text{O}_3\text{-ZrO}_2\text{-ZnS}$) для уменьшения отражения от линз в согласующих элементах и устранения интерференции в ослабителях (рис.8).

Перспективным направлением для автоматизации работы аттенюаторов в контрольно-измерительной аппаратуре ВОЛС является применение пьезоэлектрических двигателей. Вибродвигатели обладают рядом специфических свойств: высокой чувствительностью – в пределах 0,9–0,1 мкм, малой постоянной времени – порядка 0,1 мс, изменением угловой скорости в широких пределах, мгновенной фиксацией положения ротора благодаря сухому трению, миниатюрным габаритам и простой конструкции. Все эти особенности позволили создать электроуправляемый комбинированный аттенюатор с плавной и ступенчатой регулировкой поглощения коллимированного пучка излучения (рис.9).

Наиболее совершенными приборами, используемыми для ослабления оптического излучения, являются программируемые аттенюаторы.



Рис.6. Комбинированный аттенюатор
Fig. 6. Combined attenuator

parallel beam between two matching units. The sequential and concurrent methods of loss introduction are used. The advantage of concurrent method, which is implemented in all programmable attenuators, includes the capability of obtainment of limit values of attenuation upon comparably low characteristics of attenuation of constituent elements. Among the disadvantages, the increase of initial losses should be noted; it occurs due to the increase of distance between matching elements.

The range of attenuators, which represent independent devices providing the different degree of attenuation, is developed at NRIEI "Kvarz". The attenuator with concurrent method of attenuation



Рис.7. Комбинированный аттенюатор со стандартными входным и выходным соединителями
Fig. 7. Combined attenuator with standard input and output couplers

Первый отечественный программируемый аттенюатор VM 1602 предназначен для ослабления сигналов в оптическом диапазоне в составе модульной контрольно-измерительной аппаратуры с интерфейсной шиной VXI (рис.10). Диапазон изменения значений ослабления составляет 0–60 дБ с погрешностью его установки 0,2 дБ. Рабочая длина волны излучения соответствует $1,3 \pm 0,05$ мкм. Аттенюатор включает в себя оптический блок, микроконтроллерное устройство управления и интерфейс VXI.

Управление аттенюатором осуществляется с помощью графического интерфейса пользователя, разработанного на основе современных методов визуального проектирования. Видео-панель интерактивного управления прибором, реализованная в виде автономного приложения, позволяет использовать аттенюатор с ОС Windows 2000/XP/7 (рис.11).

Микроконтроллерное устройство управления включает в себя узлы управления дискретными и плавным ослабителями, а также узлы формирования сигналов об их срабатывании.

Программируемый волоконно-оптический аттенюатор ОД1-28 (рис.12), разработанный для автоматизированного рабочего места ОК6-13 [6], является самостоятельным прибором с метрологическими параметрами и занесен в Государственный реестр измерительных средств РФ.

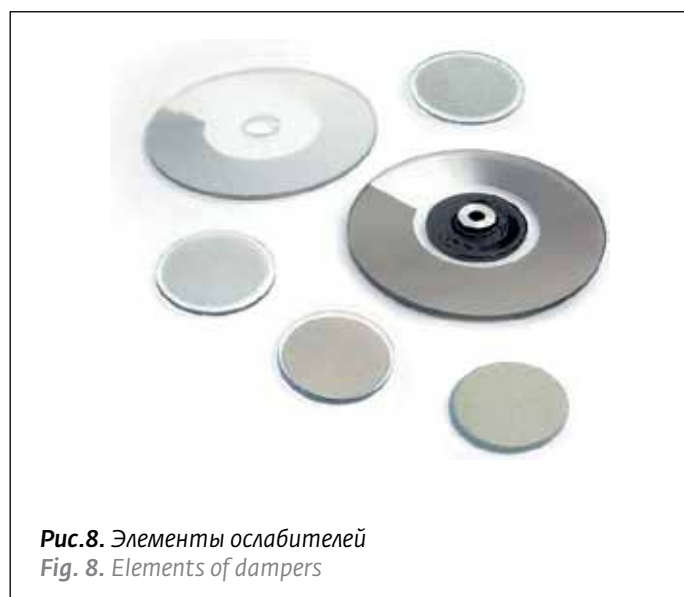


Рис.8. Элементы ослабителей
Fig. 8. Elements of dampers

introduction should be marked out among them (Fig. 5); it consists of coaxially arranged dampers with the set values of attenuation. The device allows using any combination of dampers within the range 0–80 dB with the step 3–4 dB.

In the attenuator showed in Fig. 6, the combined method of loss introduction is implemented. Discrete elements with set attenuation values from 3 to 30 dB are installed on the disk and serially introduced into radiation beam. Sequentially with the disk where the discrete dampers are arranged, the disk of smooth damper is located; during its rota-

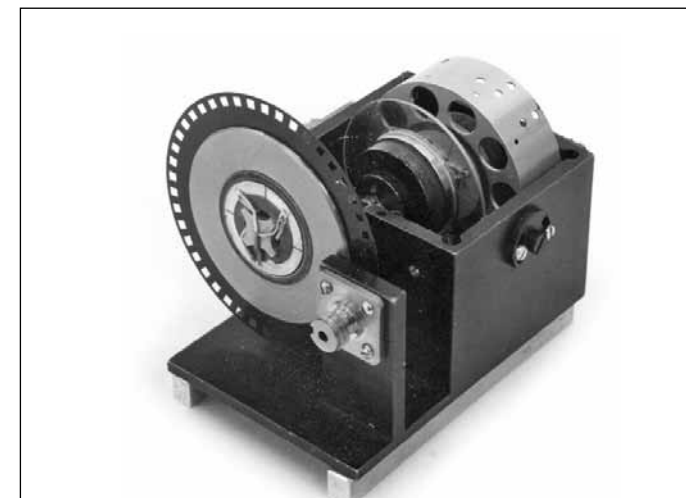


Рис.9. Электроуправляемый комбинированный аттенюатор с плавным и дискретным изменением величины ослабления
Fig. 9. Electrically controlled combined attenuator with smooth and discrete variation of attenuation value



Рис.10. Программируемый аттенюатор VM 1602
Fig. 10. Programmable attenuator VM 1602



Рис.11. Видеопанель управления аттенюатором VM 1602
Fig. 11. Video panel of VM 1602 attenuator control

Аттенюатор включает в себя базовый блок и три сменных блока, каждый из которых предназначен для соответствующей длины волны (рис.13).

В сменном блоке расположены оптический блок с приводами ослабителей и устройством их управления (рис.14).

Оптический блок представляет собой отрезок волоконно-оптического тракта с разрывом линии. На входе и выходе разрыва установлены линзовые согласующие элементы. Ослабление сигнала производится в диапазоне от 0 до 90 дБ. Рабочие длины волн соответствуют 0,85, 1,31 и 1,55 мкм. Для ослабления используется введение в оптический канал семи дискретных ослабителей с величинами затухания 2, 3, 4, 8, 16, 30, 32 дБ и одного ослабителя с переменным значением от 0 до 3 дБ. Ослабители располагаются между согласующими линзовыми элементами.

Погрешность установки ослабления аттенюатора соответствует $\Delta A = (0,2 + 0,013A)$ дБ, где A – номинальное значение воспроизводимого затухания (дБ). Начальные потери составляют не более 3 дБ.

Введение в оптический канал дискретных ослабителей осуществляется с помощью электромагнитных приводов, а управление переменным ослабителем – посредством электродвигателя с редуктором. Для полного перекрытия оптического канала устанавливается электромагнитный привод со шторкой.

tion the radiation absorption varies from 0 to 20 dB. These two disks are connected with control knobs by the train of gears. The limbs calibrated in the units dB are located on the front panel of attenuator.

Besides the disks, the plate, which has 3 positions (opened, closed and additional damper with attenuation of 20 or 30 dB) is introduced into radiation beam in the area of back panel using the electric motor. The total range of variation of attenuation values is from 0 to 80 dB. Specifically developed matching units are arranged in such manner that the radiation using microlenses is focused on the ends of outer couplers connected to attenuator. Attenuator modification, in which the standard sockets are arranged at entry and exit, is developed; these sockets are connected with matching units using internal standard couplers (Fig. 7).

The most technological method of damper production consists in the film deposition on transparent substrate. The main requirement specified in relation to the deposition material, is minimum dependence of attenuation coefficient on wavelength. This aspect is primarily met by the films of titanium and nickel. The films of nickel have the lowest selectivity; however, they are characterized by low adhesion to glass. Therefore, the dampers are made on the basis of titanium films.

In addition to absorbing coatings, specifically developed antireflection coatings ($MgF_2-Al_2O_3-ZrO_2-ZnS$) were used for the production of attenuators in order to decrease the reflection from lenses in matching elements and eliminate the interference in dampers (Fig. 8).

Use of piezoelectric motors is the prospective area for automation of attenuator operation in control and measuring equipment of fiber optic communication lines (FOCL). Vibration motors have



Рис.12. Программируемый волоконно-оптический аттенюатор ОД1-28
Fig. 12. Programmable fiber optic attenuator OD1-28

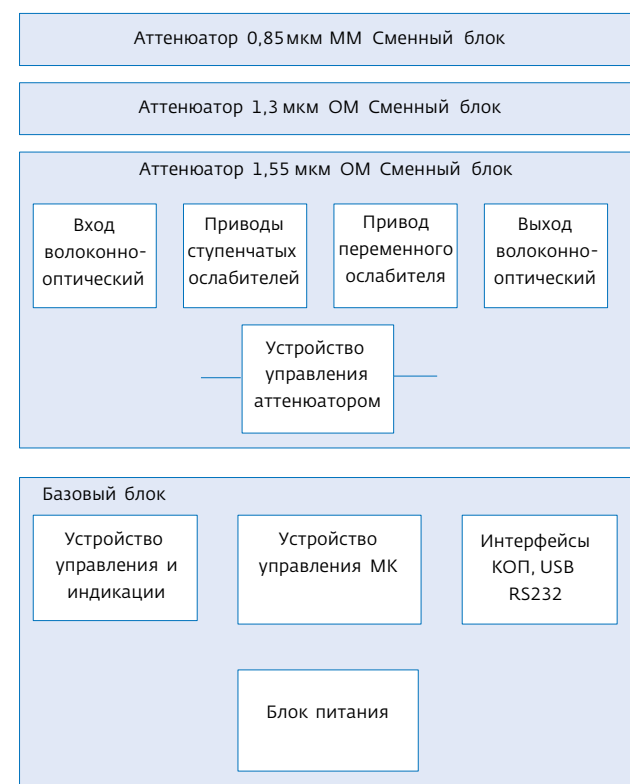


Рис.13. Электрооптическая функциональная схема программируемого волоконно-оптического аттенюатора ОД1-28

Fig. 13. Electrooptical functional layout of programmable fiber optic attenuator OD1-28

Управление системой электромагнитных приводов и электродвигателем осуществляется микроконтроллером, расположенном в базовом блоке. Уровни управляющих сигналов формируются в устройствах управления, находящихся в сменных блоках прибора. Аттенюатор обеспечивает работу как в ручном, так и в дистанционном режиме управления через интерфейсы КОП, USB или RS 232.

Использование тонкопленочных дискретных ослабителей с большим значением ослабления (16-32 дБ) в широком спектральном диапазоне (1300-1700 нм) приводит к существенному увеличению спектрально зависимой составляющей погрешности ослабления. Подобная погрешность может достигать единиц децибел на краях спектрального диапазона и поэтому, в ряде случаев, не компенсируется переменным ослабителем.

a number of specific properties: high sensitivity – within the limits 0.9-0.1 μm , low time constant – about 0.1 ms, variation of angular velocity within wide range, instant fixation of rotor position at the expense of dry friction, miniature dimensions and simple structure. All these peculiarities allow creating electrically operated combined attenuator with smooth and stage adjustment of absorption of colimated radiation beam (Fig. 9).

Programmable attenuators are the most perfect devices, which are used for attenuation of optical radiation.

The first domestic programmable attenuator VM 1602 was intended for the attenuation of signals within optical range in the structure of module control and measuring instrumentation with interface bus VXI (Fig. 10). The range of variation of attenuation values is 0-60 dB with the error of its adjustment of 0.2 dB. Operating radiation wavelength corresponds to $1.3 \pm 0.05 \mu\text{m}$. Attenuator contains optical block, micro-controller and interface VXI.

Attenuator control is performed using the user graphic interface developed on the basis of modern methods of visual design. Videowall for device interactive control executed in the form of autonomous application allows using the attenuator with OS Windows 2000/XP/7 (Fig. 11).

Microcontroller consists of the units for control of discrete and smooth dampers and units for signal generation in case of their actuation.

The programmable fiber optic attenuator OD1-28 (Fig. 12) developed for automated workplace OK6-13 [5] is independent device with metrological parameters, and it is entered into the State Register of Measuring Devices of the Russian Federation.



Рис.14. Сменный блок аттенюатора ОД1-28

Fig. 14. Replaceable module of attenuator OD1-28



Рис.15. Волоконно-оптический аттенюатор на три длины волны

Fig. 15. Fiber optic attenuator rated at three wavelengths

Непосредственное увеличение значения переменного ослабителя до 5-7 дБ приводит к уменьшению точности ослабления аттенюатора и появлению дополнительной спектрально зависимой погрешности, вносимой самим переменным ослабителем.



Рис.16. Волоконно-оптический аттенюатор на одну длину волны

Fig. 16. Fiber optic attenuator rated at one wavelength

Attenuator consists of the base block and three replaceable modules, each one of which is designed for the corresponding wavelength (Fig. 13).

Optical module with the actuators of dampers and control device is located in replaceable block (Fig. 14).

МЕТОДЫ УМЕНЬШЕНИЯ ПОГРЕШНОСТИ ОСЛАБЛЕНИЯ АТТЕНЮАТОРА

Применение сложных конструктивно-технологических методов уменьшения погрешности ослабления дискретных ослабителей не всегда обеспечивает желаемый результат. В первую очередь это определяется конечной точностью изготовления тонкопленочных оптических ослабителей. Стоит отметить, что разброс погрешности напыления покрытия достигает единиц и десятков процентов. Кроме того, процесс производства тонкопленочных ослабителей связан с большими экономическими затратами. Плюс ко всему, параметры оптических ослабителей зависят от температуры окружающей среды.

Существенное повышение метрологических характеристик волоконно-оптических аттенюаторов с дискретными ослабителями можно осуществить за счет применения алгоритмических

Optical module represents the segment of fiber optic path with line interruption. Lens matching elements are installed at the entry and exit of interruption. Signal attenuation is performed within the range from 0 to 90 dB. Operating wavelengths correspond to 0.85, 1.31 and 1.55 μm . Introduction of seven discrete dampers with the attenuation values of 2, 3, 4, 8, 16, 30 and 32 dB and one damper with variable value from 0 to 3 dB is used for attenuation in optical channel. The dampers are located between the lens matching elements.

The error of adjustment of attenuator damping corresponds to $\Delta A = (0.2 + 0.013A)$ dB, where A is the nominal value of reproduced damping (dB). The initial losses are not more than 3 dB.

Introduction of discrete dampers into the optical channel is performed using the electromagnetic actuators, and control of variable damper is performed via the electric motor with reducer. Electromagnetic actuator with cur-

методов коррекции устанавливаемого значения ослабления, базирующихся на математической обработке информации о реальных параметрах как дискретных, так и переменн-оптических ослабителей.

Решение задачи коррекции погрешности дискретных ослабителей в широком спектральном диапазоне проводилось в два этапа.

На первом этапе методом образцовых мер получали индивидуальные градуировочные характеристики ослабителей как функции от длины волны излучения $a_i(\lambda)$. Разность значений градуировочной характеристики и образцовых мер в виде массива поправок, записывалась в память прибора. Значение поправок на длинах волн, отличных от длин волн калибровки, получали методом кусочно-линейной аппроксимации. Данный метод использовали в целях уменьшения объема внутренней памяти встроенных вычислительных средств, сокращения количества образцовых мер и времени калибровки.

Однако коррекция погрешности ослабления аттенюатора с помощью массива поправок для всех комбинаций дискретных ослабителей не позволяет обеспечить необходимую точность установки ослабления.

Поэтому дополнительно был разработан метод оптимизации комбинаций включения дискретных ослабителей на основе хранящихся в памяти поправок.

Суть метода в том, что при установке заданного значения ослабления с помощью встроенных вычислительных средств прибора осуществляется такой выбор включения дискретных ослабителей, чтобы их суммарная погрешность для выбранной длины волны была меньше значения переменного ослабителя. Таким образом, выполняется неравенство

tain is installed for complete cut off of optical channel.

Control of the system of electromagnetic actuators and electric motor is performed by microcontroller located in base block. The levels of controlling signals are generated in control devices located in the device replaceable modules. Attenuator works in manual and remote mode of control through the interfaces CUC, USB or RS 232.

Use of thin-film discrete dampers with high value of attenuation (16–32 dB) within wide spectral range (1300–1700 nm) causes the significant increase of spectrally-dependent component of attenuation error. Such error can reach units of dB at the boundaries of spectral range, and therefore in many cases it is not compensated by variable damper.

Direct increase of the value of variable damper by 5–7 dB results in the decrease of precision of attenuator dampening and occurrence of additional spectrally-dependent error introduced by the variable damper.

METHODS OF DECREASE OF ATTENUATOR DAMPENING ERROR

Use of complex structurally-technological methods for decrease of dampening error of discrete dampers does not always provide desired result. First of all, it is determined by the final precision of production of thin-film optical dampers. It should be noted that the error dispersion of coating sputtering reaches units and tens percent. Besides, the process of production of thin-film dampers is associated with high economic costs. In addition, the parameters of optical dampers depend on the ambient temperature.

The significant increase of metrological characteristics of fiber optic attenuators with discrete dampers can be performed at the expense of the use of algorithmic methods of correction of set

Параметры аттенюаторов, представленных на рисунках к статье
Main parameters of attenuators

Ослабитель Damper	Диапазон ослабления, дБ Attenuation range, dB	Спектральный диапазон, мкм Spectral range, μm	Начальные потери, дБ Initial losses, dB	Размер, мм Dimensions, mm	Масса, кг Weight, kg	Управление Type of control
Рис.2 / Fig. 2	0–25	0,85; 1,3	<0,8	175×70×100	1,1	Механическое Mechanical
Рис.4 / Fig. 4	0–30	0,85; 1,3; 1,55	<2,5	31×40×40	0,07	Механическое Mechanical
Рис.5 / Fig. 5	0–60	0,85; 1,3; 1,55	2,5	100×40×40	0,37	Механическое Mechanical
Рис.6 / Fig. 6	0–70	0,85; 1,3; 1,55	2,5	115×67×68	0,8	Механическое Mechanical
Рис.7 / Fig. 7	0–70	0,85; 1,3; 1,55	<3	115×110×68	1,22	Механическое Mechanical
Рис.9 / Fig. 9	0–50	0,85; 1,3;	<3	110×50×60	0,15	Электроуправление Electric
Рис.10 / Fig. 10	0–60	1,3	<3	61×233×340	2,2	Программируемый Programmable
Рис.12 / Fig. 12	0–90	0,85–1,6	<3	368×130×392	15	Программируемый Programmable
Рис.15 / Fig. 15	0–90	0,85–1,6	2,5	213×129×443	8	Программируемый Programmable
Рис.16 / Fig. 16	0–90	0,85; 1,3–1,6	2,5	180×150×90	2,3	Программируемый Programmable

$$A_{уст}(\text{дБ}) - \sum_{i=1}^n a_i \leq a_{пл}, \quad (3)$$

где $A_{уст}$ – ослабление, установленное на передней панели,

a_i – реальные значения ослаблений дискретных ослабителей с учетом поправок,

$a_{пл}$ – реальное ослабление переменного ослабителя.

Набранное на передней панели значение ослабления (например, 29 дБ) в случае идеально точных дискретных ослабителей может быть реализовано набором 16 дБ +8 дБ +4 дБ дискретных ослабителей и +1 дБ плавного ослабителя. Однако дискретные ослабители изготавливаются с определенной погрешностью. Конкретные значения ослабления заносятся в память прибора. Туда же входят отклонения значения ослабления дискретных ослабителей в зависимости от длины волны. Таким образом, оптимальным набором для реализации ослабления 29 дБ может оказаться совсем другой набор, который определяется вычислительными средствами.

Применение подобного решения в волоконно-оптическом аттенюаторе ОД1-28 позволило снизить уровень погрешности установки ослабления до 0,2 дБ в широком спектральном и динамическом диапазонах.

Модификациями прибора ОД1-28 являются аттенюатор на 3 длины волны, выполненный в едином корпусе (рис.15) [7], и аттенюатор на одну длину волны (рис.16).

Основные параметры рассмотренных аттенюаторов представлены в таблице.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В настоящее время в НИИПИ "Кварц" проводится определение оптимальной номенклатуры волоконно-оптических аттенюаторов разных видов и назначений: от специальных метрологических систем до портативных аттенюаторов тестерного типа. Уточняются их технические, функциональные и эксплуатационные характеристики, позволяющие удовлетворять широкий круг требований пользователей в различных научных и метрологических организациях и промышленных предприятиях нашей страны.

ЛИТЕРАТУРА

1. **Hecht J.** Photonic Frontiers: Optical Test and Measurement: Looking Back/Looking Forward: A revolution in optical measurement – faster, easier and far more digital. – Laser Focus World, 2015, issue 10, p.25.

dampening value, which are based on mathematical processing of information in relation to the actual parameters of discrete and variable-optical dampers.

Solution of the task of error correction of discrete dampers within wide spectral range was performed in two stages.

At the first stage using the method of standard gages, the individual calibration characteristics of dampers as the functions of the wavelength $a_i(\lambda)$ were obtained. The difference of values of calibration characteristic and standard gages was recorded in device memory in the form of array. The values of corrections at the wavelengths, which differ from calibration wavelengths, were obtained using the method of piecewise-linear approximation. This method was used for the purposes of decrease of the volume of internal memory of built-in computing instruments, reduction of the number of standard gages and calibration time.

However, the error correction of attenuator dampening using the array of corrections for all combinations of discrete dampers does not allow providing the required precision of attenuation adjustment.

Therefore, the method of optimization of combinations of discrete damper introduction was additionally developed on the basis of corrections stored in memory.

The method consists in the fact that during adjustment of set dampening value using built-in computing instruments of device such selection of introduction of discrete dampers is performed so that their total error for chosen wavelength would be lower than the value of variable damper. Thus, the following inequality is observed:

$$A_{уст}(\text{дБ}) - \sum_{i=1}^n a_i \leq a_{пл}, \quad (3)$$

where $A_{уст}$ is the dampening set on front panel,

a_i are the actual values of dampening of discrete dampers taking into account the corrections,

$a_{пл}$ is the actual dampening of variable damper.

In case of perfectly precise discrete dampers, the value of dampening typed on the front panel (for example, 29 dB) can be implemented by the set of 16 dB + 8 dB + 4 dB discrete dampers and +1 dB smooth damper. However, the discrete dampers are made with certain error. Specific values of attenuation are entered into the device memory. The deviations of attenuation value of discrete dampers depending on

2. **Воронков Г.Л.** Ослабители оптического излучения. – Лю: Машиностроение, 1980.
3. **Шишловский А.А.** Прикладная физическая оптика. – М.: Физматгиз, 1961.
4. **Гаврилов В.Н., Грязнов Ю.М. и др.** Генераторы сигналов оптические ОГ4-162 и ОГ-163. – Световодные системы связи и передачи информации: Тез. докл. IV Всесоюз. конф., Москва, 1984.
5. **Гаврилов В.Н., Грязнов Ю.М. и др.** Генераторы АМ оптических сигналов ОГ4-181, ОГ4-182. – Техника средств связи. Сер.: Радиоизмерительная техника, 1991, вып. 2, с.43-50.
6. **Гаврилов В.Н., Грязнов Ю.М., Махалов А.В., Частов А.А.** Автоматизированный рабочий эталон ОК6-13 для проверки средств измерения параметров ВОСП. – Радиолокация, навигация, связь: Материалы XIV конференции, Воронеж, 2008, т. 2, с. 1372-1386.
7. **Гаврилов В.Н., Грязнов Ю.М., Махалов А.В., Моисеев П.Д., Синев Д.А., Частов А.А.** Средство контроля параметров волоконно-оптических модулей. – Радиоизмерения и электроника, Н. Новгород: ОАО "ФНПЦ НИИПИ Кварц им. А.П. Горшкова", 2013, № 19, с. 25-30.

wavelength are also included there. Thus, the optimal set for implementation of attenuation of 29 dB can be represented by totally different set, which is determined by computing instruments.

Use of such solution in fiber optic attenuator OD1-28 allowed decreasing the error level of attenuation device to 0.2 dB within wide spectral and dynamic ranges.

Modifications of the device OD1-28 include the attenuator rated at 3 wavelengths executed in one case (Fig. 15) [6] and attenuator rated at one wavelength (Fig. 16). The main parameters of abovementioned attenuators are given in Table.

CONCLUSION

Currently, the optimal nomenclature of fiber optic attenuators of different types and with different purposes, from special metrological systems to portable attenuators of tester type, is being determined at our institute. Their technical, functional and operational characteristics, which allow meeting the wide range of user requirements in various scientific and metrological organizations and industrial enterprises of our country, are being defined.