

Раздел II. Электроника и нанотехнологии

УДК 621.382

DOI 10.18522/2311-3103-2021-3-114-121

Ю.М. Богданов, А.Н. Зикий, А.И. Пустовалов

АТТЕНЮАТОР С ЦИФРОВЫМ УПРАВЛЕНИЕМ НА БАЗЕ МОДУЛЯ М44752

Аттенюаторы широко используются в радиоприемных устройствах для расширения динамического диапазона входных сигналов, а также для управления выходной мощностью радиопередатчиков. В последнее время аттенюаторы массово используются в приемопередающих модулях активных антенных решеток. Аттенюаторы различаются по диапазону рабочих частот, элементной базе, методу управления, рабочей мощности. Актуальной задачей является создание и исследование новых микросхем аттенюаторов с цифровым управлением отечественного производства. Целью данной работы является экспериментальное исследование основных параметров и характеристик цифрового аттенюатора дециметрового диапазона волн. Объектом исследования является аттенюатор типа М44752 производства АО «НПП «Исток» им. А.И. Шокина», установленный на тест-плате. Представлены результаты экспериментального исследования в диапазоне рабочих частот от 0,1 до 2 ГГц. Даны схема включения, фото макета и шесть амплитудно-частотных характеристик для разных управляющих кодов. Достигнуты следующие электрические параметры: – диапазон рабочих частот от 0,1 до 2 ГГц; – диапазон затуханий от 1 до 50 дБ; – допустимая входная мощность не более 23 дБм; – число разрядов управления 6; – время переключения не более 50 нс; – КСВН входа и выхода не более 2. Полученные результаты исследования модуля М44752 могут быть использованы в сверхширокополосной приемопередающей аппаратуре связи различного назначения, навигации и радиолокации. Актуальность исследования подтверждается двумя современными тенденциями – микроминиатюризацией радиоэлектронной аппаратуры и импортозамещением.

СВЧ аттенюатор с цифровым управлением; диапазон частот; сверхширокополосный; эксперимент; амплитудно-частотная характеристика; код управления.

Yu.M. Bogdanov, A.N. Zikiy, A.I. Pustovalov

ATTENUATOR WITH DIGITAL CONTROL BASED ON THE M44752 MODULE

Attenuators are often used in radio receivers to expand the dynamic range of input signals, as well as to control the output power of radio transmitters. Recently, attenuators are used in transceiver modules of active antenna arrays. Attenuators differ in operating frequency range, base of elements, control method, operating power. An urgent task is the creation and research of new microcircuits of attenuators with digital control of domestic production. The purpose of this work is an experimental research of the main parameters and characteristics of a digital attenuator of the decimeter wave range. The object of the study is an attenuator of the M44752 type installed on the test board. It is manufactured by JSC "SPE "Istok" named after A.I. Shokin". The results of the experimental research are given in the operating frequency range from 0.1 to 2 GHz. There are a switching circuit, a photo of a model and six amplitude-frequency characteristics for different control codes. The following electrical parameters have been achieved: – operating frequency range is from 0.1 to 2 GHz; – attenuation range is from 1 to 50 dB; – permissible input

power is not more than 23 dBm; – the number of control bits is 6; – switching time is not more than 50 ns;– VSWR of input and output is not more than 2. The obtained results of the study of the M44752 module can be used in ultra-wideband transceiver communication equipment for various purposes, navigation and radiolocation. The relevance of the research is confirmed by two current trends – microminiaturization of electronic equipment and import substitution.

Microwave attenuator with digital control; frequency range; ultra-wideband; experiment; amplitude-frequency characteristic; control code.

Введение. Аттенюаторы нашли широкое применение в приемо-передающей и измерительной аппаратуре. Наиболее массово аттенюаторы применяют в приемо-передающих модулях фазированных антенных решеток. Предприятиями отечественной и зарубежной промышленности выпускается большое количество типов аттенюаторов, отличающихся элементной базой, диапазоном рабочих частот, рассеиваемой мощностью, способом управления.

Микросхемы цифровых ступенчатых аттенюаторов изготавливают фирмы Analog Devices, M/A-COM, Qorvo, Peregrine Semiconductor, Mini-Circuits, Honeywell и другие фирмы США.

По управляемым аттенюаторам опубликовано значительное число работ, в том числе монографии [1–3], учебные пособия [4, 5], статьи [6–13], реклама [14–15], диссертации [16–20].

Объектом исследования в данной работе является серийный аттенюатор типа M44752 АПНТ.434820.054ТУ производства АО «НПП «Исток» им. А.И. Шокина», полученный от производителя в составе тест-платы.

Целью работы является анализ основных характеристик изделия, выявление особенностей его применения. Аналогом исследуемого аттенюатора является микросхема AT-263 производства фирмы M/A-COM [15].

К аттенюатору предъявляются следующие требования:

- ◆ диапазон рабочих частот от 10 до 2000 МГц;
- ◆ диапазон затуханий от 1 до 50 дБ (относительно начального затухания);
- ◆ допустимая входная мощность не более 23 дБм;
- ◆ число разрядов управления 6;
- ◆ время переключения не более 50 нс;
- ◆ КСВН входа и выхода не более 2.

Схема и конструкция. Схема включения аттенюатора приведена на рис. 1. Аттенюатор содержит модуль M44752, два соединителя типа SMA, резисторы и конденсаторы. Разделительные конденсаторы C1 и C4 предотвращают попадание внешних напряжений в цепи радиочастотной части аттенюатора. Блокировочные конденсаторы C2 и C3 позволяют уменьшить пульсации питающего напряжения.

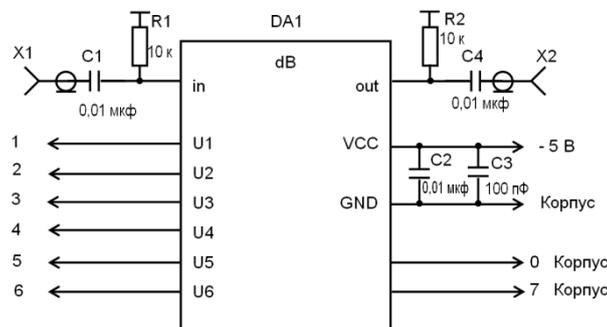


Рис. 1. Схема включения аттенюатора

Аттенюатор смонтирован на печатной плате из фольгированного диэлектрика размером $55 \times 40 \times 1,5$ мм. Кроме собственных цепей аттенюатора, плата содержит тестовый отрезок копланарной линии передачи. Фото платы аттенюатора показано на рис. 2. Плата имеет антикоррозийное покрытие золотом и множество заземляющих металлизированных отверстий вдоль копланарной линии передачи. Тестовый отрезок копланарной линии передачи позволяет уточнить собственные потери микросхемы.

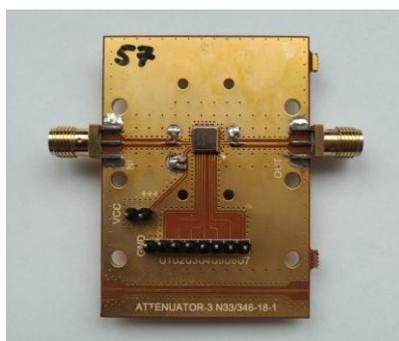


Рис. 2. Фото платы аттенюатора с установленным модулем M44752

Эксперимент. Эксперимент проводили на установке, структурная схема которой приведена на рис. 3. Основным инструментом для снятия амплитудно-частотных характеристик – векторный анализатор цепей типа PNA-L. В качестве источника питания использован прибор типа GPC-730600. Управляющее напряжение из 6 бит формировалось с помощью вспомогательного оборудования – пульта, содержащего набор тумблеров и гнезд.

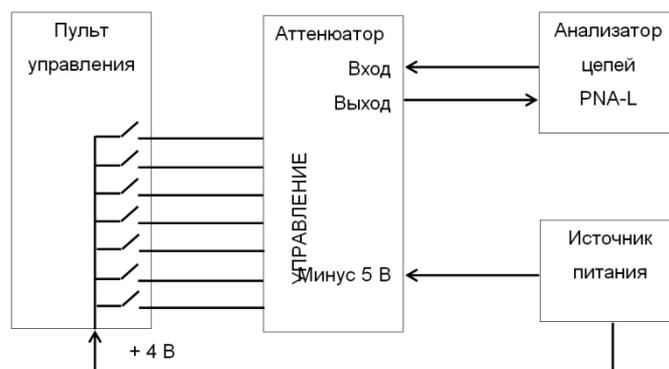


Рис. 3. Структурная схема измерительной установки

В первом эксперименте на управляющие входы аттенюатора поданы все нули. При этом амплитудно-частотная характеристика показывает затухание не более 2,6 дБ (кривая 0 на рис. 4).

Во втором эксперименте на управляющие входы аттенюатора подана комбинация, соответствующая затуханию 10 дБ. В этом случае АЧХ на рис. 4 отмечена цифрой 10.

В третьем эксперименте на управляющие входы аттенюатора подана комбинация, соответствующая затуханию 20 дБ. В этом случае АЧХ на рис. 4 отмечена цифрой 20.

В четвертом, пятом и шестом экспериментах были проведены аналогичные действия. Результирующие АЧХ показаны на рис. 4.

Значения вносимого ослабления модуля M44752

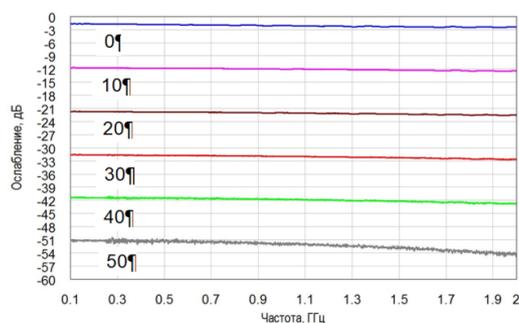


Рис. 4. Амплитудно-частотные характеристики аттенюатора для шести комбинаций управляющего кода

Таблица 1

Значения нормированного вносимого ослабления для шести комбинаций управляющего кода

Ослабление, дБ	Минимальное значение вносимого ослабления, дБ	Максимальное значение вносимого ослабления, дБ	Нормализованное минимальное значение вносимого ослабления, дБ	Нормализованное максимальное значение вносимого ослабления, дБ	Неравномерность ослабления, дБ
Код управления "0 дБ"	1,67	2,58	0	0	0
Код управления "10 дБ"	11,69	12,54	10,02	9,96	± 0,03
Код управления "20 дБ"	21,69	22,64	20,02	20,06	± 0,02
Код управления "30 дБ"	31,55	32,76	29,88	30,18	± 0,15
Код управления "40 дБ"	41,18	42,95	39,51	40,37	± 0,43
Код управления "50 дБ"	50,46	54,8	48,79	52,22	± 1,72

Ниже в табл. 2 проводится сравнение заданных и достигнутых параметров аттенюатора.

Таблица 2

Основные параметры аттенюатора М44752

Наименование параметра, размерность	Задано	Измерено
Диапазон рабочих частот, МГц	10 - 2000	100 - 2000
Максимальные потери для кода управления "0 дБ", дБ	5	2,58
Максимальные потери для кода управления "10 дБ", дБ	15	12,54
Максимальные потери для кода управления "20 дБ", дБ	25	22,64
Максимальные потери для кода управления "30 дБ", дБ	35	32,76
Максимальные потери для кода управления "40 дБ", дБ	45	42,95
Максимальные потери для кода управления "50 дБ", дБ	55	54,8
Максимальный коэффициент стоячей волны по напряжению	2	< 2

Из табл. 2 видно, что все заданные параметры аттенюатора обеспечиваются.

В табл. 3 приведено сравнение исследованного аттенюатора с аналогом АТ-263, которое показывает преимущество отечественной разработки по диапазону изменения затухания на 19 дБ и неравномерности АЧХ при сравнимых других параметрах.

Таблица 3

Сравнение параметров аттенюаторов М44752 и АТ-263

Наименование параметра, размерность	М44752	АТ-263
Диапазон рабочих частот, ГГц	0,01 - 2	DC - 2
Пределы изменения затухания, дБ	0 - 50	0 - 31
Шаг установки затухания, дБ	1	1
Время переключения, нс, не более	50	40
Число разрядов управления	6	5
Неравномерность АЧХ, дБ, в пределах 0-31 дБ	± 0,15	± 0,25

Заключение:

1. Проведено экспериментальное исследование аттенюатора дециметрового диапазона волн с цифровым управлением. Показано достижение высоких электрических параметров, сопоставимых с зарубежным аналогом типа АТ-263 фирмы М/А-СОМ.

2. Исследованный аттенюатор рекомендуется использовать в приёмно-передающей и измерительной аппаратуре.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Сверхширокополосные микроволновые устройства. / под ред. А.П. Креницкого и В.П. Мещанова. – М.: Радио и связь, 2001. – 560 с.
2. Белоус А.И., Мерданов М.К., Шведов С.В. СВЧ электроника в системах радиолокации и связи. Техническая энциклопедия. В 2^х кн. Кн. 2. – М.: Техносфера, 2016. – 728 с.
3. Радиоизмерительная аппаратура СВЧ и НВЧ. Узловая и элементная базы / под ред. А.М. Кудрявцева. – М.: Радиотехника, 2006. – 208 с.
4. Зикий А.Н., Помазанов А.В. Устройства формирования сигналов с псевдослучайной перестройкой рабочей частоты: учеб. пособие. – Таганрог: Изд-во ЮФУ, 2016. – 113 с.
5. Белов Л.А. Устройства формирования СВЧ сигналов и их компоненты: учеб. пособие. – М.: Изд. дом МЭИ, 2010. – 320 с.
6. Дьяконов В.П. Монолитные СВЧ-микросхемы аттенуаторов и усилителей компании Hitite Microwave // Компоненты и технологии. – 2012. – № 2.
7. Зикий А.Н., Зламан П.Н., Горбатенко О.А. Экспериментальное исследование ступенчатого аттенуатора // Матер. 1 Всероссийской научно-практической конференции: "Инфокоммуникации и информационная безопасность: состояние, проблемы и пути решения". – Курск, ЮЗГУ, 2014. – С. 39-42.
8. Абакумова Н.В., Богданов Ю.М., Балыко А.К. и др. Схемы СВЧ аттенуаторов на полевых транзисторах с барьером Шоттки // Радиотехника. – 2007. – № 3. – С. 79-87.
9. Зикий А.Н., Власенко Д.В. Аттенуатор миллиметрового диапазона // Матер. 4 международной научной конференции "Современные проблемы радиоэлектроники". – Ростов-на-Дону: ЮРГУЭС, 2012. – С. 315-318.
10. Карпов Ю. Отечественные электрически управляемые СВЧ-аттенуаторы // Компоненты и технологии. – 2007. – № 8.
11. Белов Л.А. Аттенуаторы СВЧ сигналов // Электроника: наука, технология, бизнес. – 2006. – № 2.
12. Очеретянюк И. СВЧ-аттенуаторы фирмы Herley General Microwave с аналоговым и цифровым управлением // Современная электроника. – 2007. – № 1.
13. Баров А.А., Кондратенко А.В., Хохол Д.С. GaAs МИС управляемого СВЧ-аттенуатора диапазона 0–20 ГГц // Доклады ТУСУРа. – Декабрь 2010. – № 2 (22). Ч. 2. – С. 187-189.
14. Digital Attenuator HMC939A Data Scheet. Analog Devices. – 6 p.
15. Digital Attenuator AT-263. Data Scheet. M/A-COM Technology Solutions Inc. – 5 p. – www.macomtech.com.
16. Талышев Н.В. Синтез дискретных аттенуаторов проходного типа при произвольных иммитансах источника сигнала и нагрузки: автореф. дисс. ... канд. техн. наук. – Воронеж: Воронежский институт МВД РФ, 2000. – 16 с.
17. Чижов А.И. Аналитические методы расчета и структурного анализа СВЧ устройств на основе теории цепей: автореф. дисс. ... д-ра техн. наук. – Нижний Новгород, НГТУ, 2011. – 17 с.
18. Федоров В.Н. Исследование волновых процессов в связанных полосковых линиях и разработка на их основе быстродействующих аттенуаторов и динамических корректоров: автореф. дисс. ... канд. техн. наук. – Томск: ТУСУР, 1999. – 24 с.
19. Рубанович М.Г. Сверхширокополосные поглощающие устройства высокого уровня мощности: автореф. дисс. ... д-ра техн. наук. – Новосибирск: НГТУ, 2015.
20. Малышев А.В. Автоматизация и управление процессом производства пленочных аттенуаторов и резисторов: автореф. дисс. ... канд. техн. наук. – СПб.: СЗГТУ, 2001.

REFERENCES

1. Sverkhshirokopolosnye mikrovolnovye ustroystva. [Ultra-wideband microwave devices], ed. by A.P. Krenitskogo i V.P. Meshchanova. Moscow.: Radio i svyaz', 2001, 560 p.
2. Belous A.I., Merdanov M.K., Shvedov S.V. SVCh elektronika v sistemakh radiolokatsii i svyazi. Tekhnicheskaya entsiklopediya [Microwave electronics in radar and communication systems. Technical encyclopedia]. In 2 2 books. Book 2. Moscow: Tekhnosfera, 2016, 728 p.
3. Radioizmeritel'naya apparatura SVCh i NVCh. Uzlovaya i elementnaya bazy [Microwave and NVH radio measuring equipment. Nodal and element bases], ed. by A.M. Kudryavtseva. Moscow: Radiotekhnika, 2006, 208 p.
4. Zikiy A.N., Pomazanov A.V. Ustroystva formirovaniya signalov s psevdosluchaynoy perestroykoй rabochey chastoty: ucheb. posobie [Devices for generating signals with pseudorandom adjustment of the operating frequency: textbook]. Taganrog: Izd-vo YuFU, 2016, 113 p.

5. *Belov L.A.* Ustroystva formirovaniya SVCh signalov i ikh komponenty: ucheb. posobie [Devices for generating microwave signals and their components: a textbook]. Moscow: Izd. dom MEI, 2010, 320 p.
6. *D'yakonov V.P.* Monolitnye SVCh-mikroskhemy attenuatorov i usiliteley kompanii Hittite Microwave [Monolithic microwave chips of attenuators and amplifiers of the Hittite Microwave company], *Komponenty i tekhnologii* [Components and technologies], 2012, No. 2.
7. *Zikiy A.N., Zlaman P.N., Gorbatenko O.A.* Eksperimental'noe issledovanie stupenchatogo attenuatora [Experimental study of a step attenuator] *Mater. 1 Vserossiyskoy nauchno-prakticheskoy konferentsii: "Infokommunikatsii i informatsionnaya bezopasnost': sostoyanie, problemy i puti reshe-niya»* [Materials of the 1st All-Russian Scientific and Practical Conference: "Infocommunications and information security: state, problems and solutions"]. Kursk, YuZGU, 2014, pp. 39-42.
8. *Abakumova N.V., Bogdanov Yu.M., Balyko A.K. i dr.* Skhemy SVCh attenuatorov na polevykh tranzistorakh s bar'ером SHottki [Schemes of microwave attenuators on field-effect transistors with a Schottky barrier], *Radiotekhnika* [Radio Engineering], 2007, No. 3, pp. 79-87.
9. *Zikiy A.N., Vlasenko D.V.* Attenuator millimetrovogo diapazona [Attenuator of the millimeter range], *Mater. 4 mezhdunarodnoy nauchnoy konferentsii "Sovremennye problemy radioelektroniki"* [Materials of the 4th international scientific conference "Modern problems of radio electronics"]. Rostov-on-Don: YuRGUES, 2012, pp. 315-318.
10. *Karpov Yu.* Otechestvennye elektricheski upravlyaemye SVCh-attenuatory [Domestic electrically controlled microwave attenuators], *Komponenty i tekhnologii* [Components and technologies], 2007, No. 8.
11. *Belov L.A.* Attenuatory SVCh signalov [Attenuators of microwave signals], *Elektronika: nauka, tekhnologiya, biznes* [Electronics: science, technology, business], 2006, No. 2.
12. *Ocheretyanko I.* SVCh-attenuatory firmy Herley General Microwave s analogovym i tsifrovym upravleniem [Herley General Microwave microwave attenuators with analog and digital control], *Sovremennaya elektronika* [Modern electronics], 2007, No. 1.
13. *Barov A.A., Kondratenko A.V., Khokhol D.S.* GaAs MIS upravlyaemogo SVCh-attenuatora diapazona 0–20 GGts [GaAs MIS controlled microwave attenuator range 0-20 GHz], *Doklady TUSURa* [Reports of TUSUR], Dekabr' 2010, No. 2 (22), Part 2, pp. 187-189.
14. Digital Attenuator HMC939A Data Scheet. Analog Devices, 6 p.
15. Digital Attenuator AT-263. Data Scheet. M/A-COM Technology Solutions Inc., 5 p. www.macomtech.com.
16. *Talyshev N.V.* Sintez diskretnykh attenuatorov prokhodnogo tipa pri proizvol'nykh immitansakh istochnika signala i nagruzki: avtoref. diss. ... kand. tekhn. nauk [Synthesis of discrete attenuators of the pass-through type at arbitrary immitances of the signal source and load: abstract, cand. of eng. sc. diss.]. Voronezh: Voronezhskiy institut MVD RF. 2000, 16 p.
17. *Chizhov A.I.* Analiticheskie metody rascheta i strukturnogo analiza SVCh ustroystv na osnove teorii tsepey: avtoref. diss. ... d-ra tekhn. nauk [Analytical methods of calculation and structural analysis of microwave devices based on the theory of circuits: abstract, dr. of eng. sc. diss.]. Nizhniy Novgorod, NGTU, 2011, 17 p.
18. *Fedorov V.N.* Issledovanie volnovykh protsessov v svyazannykh poloskovykh liniyakh i razrabotka na ikh osnove bystrodeystvuyushchikh attenuatorov i dinamicheskikh korrektorov: avtoref. diss. ... kand. tekhn. nauk [The study of wave processes in coupled strip lines and the development of high-speed attenuators and dynamic correctors based on them: abstract, cand. of eng. sc. diss.]. Tomsk: TUSUR, 1999, 24 p.
19. *Rubanovich M.G.* Sverkhshirokopolosnye pogloshchayushchie ustroystva vysokogo urovnya moshchnosti: avtoref. diss. ... d-ra tekhn. nauk [Ultra-wideband high-power absorbing devices: abstract, dr. of eng. sc. diss.]. Novosibirsk: NGTU, 2015.
20. *Malyshev A.V.* Avtomatizatsiya i upravlenie protsessom proizvodstva plenochnykh attenuatorov i rezistorov: avtoref. diss. ... kand. tekhn. nauk [Automation and control of the production process of film attenuators and resistors: abstract, cand. of eng. sc. diss.]. Saint Petersburg: SZGTU, 2001.

Статью рекомендовал к опубликованию к.т.н. М.И. Дулин.

Богданов Юрий Михайлович – АО "НПП "Исток" им. Шокина"; e-mail: zikiy50@mail.ru; г. Фрязино, Россия; начальник отдела.

Зикий Анатолий Николаевич – Южный федеральный университет; e-mail: zikiy50@mail.ru; г. Таганрог, Россия; кафедра информационной безопасности телекоммуникационных систем; к.т.н.; с.н.с.; доцент.

Пустовалов Алексей Иванович – АО «Таганрогский научно-исследовательский институт связи»; e-mail: pustovalov@yahoo.com; г. Таганрог, Россия; начальник лаборатории.

Bogdanov Jurij Mihajlovich – JSC "RPC "Istok" named after Shokin"; e-mail: zikiy50@mail.ru; Fryazino, Russia; department head.

Zikiy Aatoliy Nikolaecich – Southern Federal University; e-mail: zikiy50@mail.ru; Taganrog, Russia; the department of information security of telecommunication systems; cand. of eng. sc.; senior researcher; assistant professor.

Pustovalov Aleksey Ivanovich – АО «ТНИИС»; e-mail: pustovalov@yahoo.com; Taganrog, Russia; laboratory head.

УДК 621.3.049.7

DOI 10.18522/2311-3103-2021-3-121-127

Е.Ю. Гусев, А.В. Сарыев

ПРОЕКТИРОВАНИЕ КРЕМНИЕВОГО МИКРОЗОНДА ДЛЯ МАЛОИНВАЗИВНОГО НЕЙРОИНТЕРФЕЙСА

Микрозонды стали важным инструментом исследования нейронной активности. Исследования и разработки в области инвазивных нейроинтерфейсов направлены на снижение характерного повреждения нервной ткани за счет уменьшения диаметра имплантируемых зондов менее 100 мкм. Подобные структуры изготавливают методами микрообработки, в частности различными видами анизотропного травления. При этом на размеры и форму зонда оказывают влияние условия травления. Последние должны учитываться на этапе проектирования конструкции зонда. В работе проведена оценка диапазонов геометрических параметров кремниевого микрозонда с учетом условий травления и количества электродов. Аналитические расчеты проводили для структуры зонда, представленной четырьмя областями различной ширины, несущих до семи электродов. Получены зависимости ширины нижнего основания трапецевидного сечения зонда и размера маски от толщины и ширины верхнего основания зонда. Установлены допустимые диапазоны размеров для предложенного варианта четырехуровневого микрозонда; в частности, минимальные значения ширины верхнего основания, составили 17, 28, 39 и 50 мкм, а соответствующие им диапазоны допустимых значений толщин зонда для вариантов с 1 электродом – 30–58 мкм, 2 и 3 электродами – 30–51 мкм, 4 и 5 электродами – 30–43 мкм, а для случая зонда с 6 и 7 электродами – 30–35 мкм. Выполнена оценка величины коррекции размера маски, отражающая влияния условий травления на геометрию зонда.

Многоэлектродный микрозонд; анизотропное жидкостное травление; кремний.

E.Yu. Gusev, A.V. Saryev

DESIGN OF SILICON MICROPROBE FOR MINIMALLY INVASIVE NEURAL INTERFACE

Microprobes have become an important tool in the study of brain activity. Research and development in the field of invasive neurointerfaces is aimed at reducing the characteristic damage to the nervous tissue by reducing the diameter of the implanted probes to less than 100 μm. Such structures are produced by micromachining, in particular, by types of anisotropic etching. In this case, the size and shape of the probe are influenced by the etching conditions. The latter should be