

НОВЫЕ РАДИОЭЛЕКТРОННЫЕ СИСТЕМЫ И ЭЛЕМЕНТЫ

УДК 621.371.3

ЭЛЕКТРОННЫЙ УСИЛИТЕЛЬ ДЛЯ СОВРЕМЕННЫХ АКУСТООПТИЧЕСКИХ СПЕКТРОМЕТРОВ

© 2019 г. П. С. Мартьянов^{1, *}, В. И. Пустовойт^{1, 2}, В. Н. Шорин²

¹Научно-технологический центр уникального приборостроения РАН,
Российская Федерация, 117342 Москва, ул. Бутлерова, 15

²Всероссийский научно-исследовательский институт физико-технических радиотехнических измерений,
Российская Федерация, 141570, г.п. Менделеево Московской обл.

*E-mail: La3232@mail.ru

Поступила в редакцию 07.02.2019 г.

После доработки 07.02.2019 г.

Принята к публикации 02.03.2019 г.

Приведен анализ электронных усилителей для современных акустооптических спектрометров, в основе которых лежит двухкристальная схема последовательной дифракции падающего излучения на акустических волнах, распространяющихся в каждой акустооптической (АО) ячейке. Такая схема дифракции обладает большей спектральной разрешающей способностью, сохраняя все остальные преимущества традиционных АО-спектрометров. Дано описание функциональной блок-схемы двухкристального акустооптического спектрометра и указаны необходимые требования к электронным блокам. Представлены результаты совместного использования устройства усиления мощности сигнала и разработанного ранее широкополосного синтезатора частоты для возбуждения звуковых волн в АО-ячейках; получены выходные значения амплитуд усиленных сигналов.

DOI: 10.1134/S0033849419080114

Современные акустооптические (АО) приборы способны измерить спектральное распределение оптического излучения, осуществить пространственное управление направлением распространения лазерного луча, переадресовать информационный поток в волокне с одного направления на другой, получить изображение цветного объекта в произвольном выбранном спектральном интервале и многое другое. Эти приборы и устройства сегодня могут работать в весьма жестких условиях космоса, при высоких температурах, больших уровнях вибрации. Оптический диапазон современных АО-приборов охватывает область длин волн от ультрафиолетового (УФ) излучения до инфракрасного (ИК), а с развитием технологии метаматериалов может продвигаться и в область терагерцового диапазона. АО-приборы по сравнению с существующими, основанными на традиционных оптических принципах, обладают целым рядом преимуществ: большой светосилой и высоким отношением сигнал/шум, отсутствием механических движущихся частей; у них малые габариты и небольшие массы.

Важное место среди указанных приборов занимают АО-спектрометры. Сейчас созданы специализированные портативные спектрометры, которые измеряют рамановское рассеяние от возбуждающего среду лазерного излучения и позво-

ляют определить структуру и качество кристалла (например, алмаза), а в некоторых случаях даже изотопный состав [1–3]. Особо следует отметить, что с развитием технологии изготовления идентичных АО-ячеек стало возможным создание двухкристальных АО-спектрометров, использующих последовательную дифракцию светового излучения на двух ячейках. Такие спектрометры обладают значительно лучшим отношением сигнал/шум [1–4]. Среди созданных АО-спектрометров необходимо отметить космические поляризационные спектрометры видимого диапазона “Трассер” и “Трассер-0” разработанные во Всероссийском научно-исследовательском институте физико-технических радиотехнических измерений (ВНИИФТРИ) для исследования подстилающей поверхности Земли. В период с 1987 по 1992 гг. они эксплуатировались на космических аппаратах “Космос-1500” и “Океан-0”. Одновременно были созданы их авиационные и судовые аналоги, которые обеспечивали методики подспутниковых измерений и получение независимой информации о загрязнении различных водных акваторий и отработки методики учета влияния атмосферы на измерения [5]. Были разработаны и созданы лабораторные и портативные АО-спектрометры УФ, видимого, ближнего ИК-диапазонов на основе кристаллов кварца, парателлурита, молибдата свинца (сов-

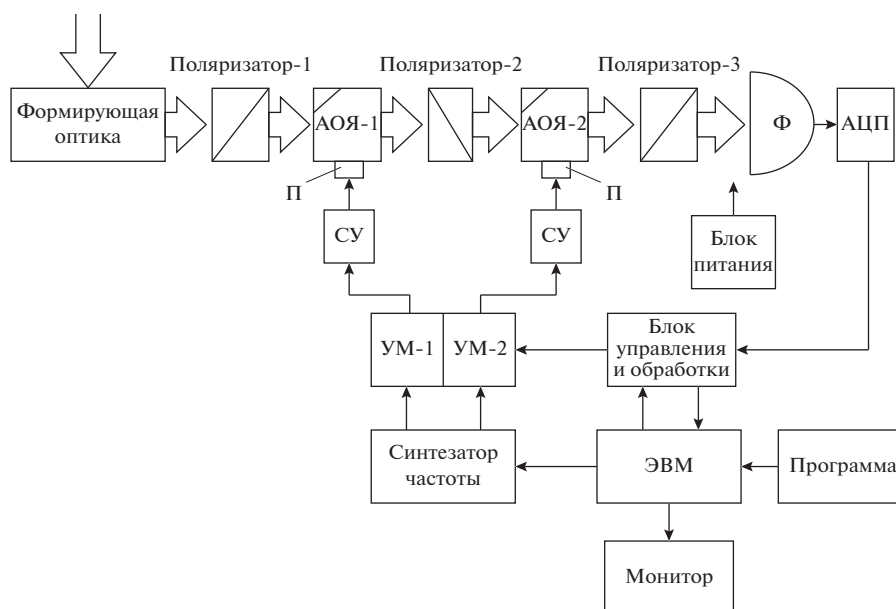


Рис. 1. Структурная блок-схема двухкристального АО-спектрометра: АОЯ-1 и АОЯ-2 – акустооптические ячейки; Ф – фотоприемник; П – преобразователь; СУ – согласующее устройство; УМ-1 и УМ-2 – усилители мощности; широкие стрелки – оптическое излучение, тонкие – электрический ток.

местные разработки ВНИИФТРИ и Научно-технологического центра уникального приборостроения РАН (НТЦ УП РАН)). Существенно, что при создании этих спектрометров были решены и отработаны многие инженерно-технические вопросы: модульный подход к разработке всей электроники, созданы алгоритмы управления и измерения, а также программы и способы отображения информации. В частности, были созданы спектрометры с резкой фазовой модуляцией звуковой волны. Эта оригинальная идея [6], положенная в основу алгоритма измерений спектрального распределения излучения объекта, позволила значительно повысить точность спектральных измерений для объектов, имеющих малые изменения спектральной яркости. На основе этого метода измерений сегодня разрабатываются новые, более точные алгоритмы спектральных измерений [7].

Перечисленные выше примеры показывают, что при создании этих спектрометров были решены многие задачи электроники для возбуждения акустических волн в кристалле, созданы компактные синтезаторы частоты, позволяющие по программе задавать требуемый набор частот звуковых волн для алгоритма спектральных измерений, разрабатывать и реализовать электронную архитектуру спектрометра, допускающего различные алгоритмы измерений, включая адаптивные.

В последнее время в связи с широким использованием двухкристальных АО-схем для спектральных измерений, пришлось разработать специальные генераторы и усилители ВЧ-колебаний с частотой и фазовой модуляцией, а также с элек-

тронным синтезом гармонических колебаний. Общая структура двух кристального АО-спектрометра приведена на рис. 1. Анализируемое световое излучение через формирующую оптику попадает в двойной АО-монохроматор, состоящий из входного (1), промежуточного (2) и выходного (3) поляризаторов, и двух АО-ячеек. Часть излучения, продифрагировавшая на объемных бегущих звуковых волнах в обеих АО-ячейках и выделенная поляризатором, попадает на фотоприемник. Для управления аппаратной функцией монохроматора на пьезоэлектрические преобразователи АО-ячеек подаются электрические сигналы определенных частот и мощностей, вырабатываемые двухканальным синтезатором и доведенные усилителями мощности до необходимой амплитуды. Усилители мощности позволяют манипулировать амплитудой сигнала и включать/выключать выходной сигнал для вычитания из суммарного фотосигнала остаточной световой засветки. Синхронная цифровая обработка позволяет с достаточной линейностью измерить величину оптического излучения в полосе длин волн, определяемой аппаратной функцией монохроматора. Сканирование по частотам сигналов, подаваемых на преобразователи, позволяет получить значения фототока приемника при разных значениях звуковой частоты и, решая обратную задачу (по данным значениям фототока и известной инструментальной функции двухкристального АО-спектрометра), найти спектральное распределение падающего излучения.

Отличительной особенностью представленной схемы является наличие двух идентичных

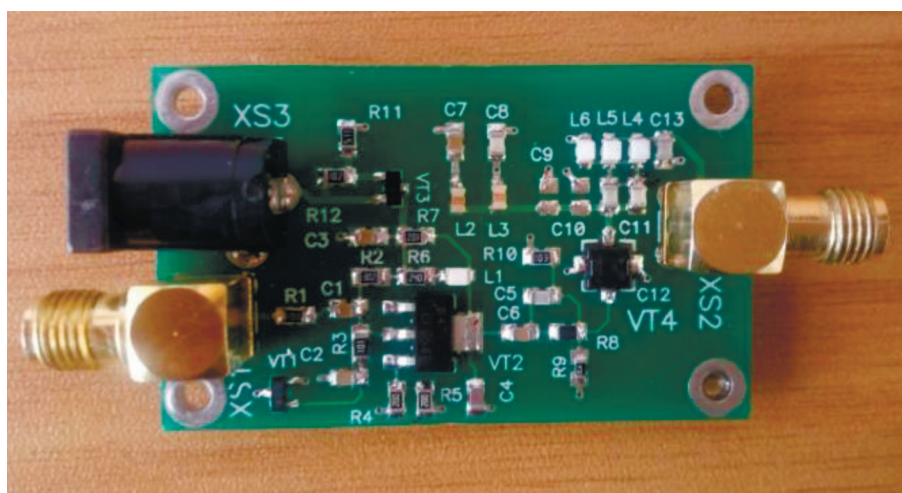


Рис. 2. Макет печатного узла ВЧ-усилителя.

АО-ячеек, в которых возбуждаются звуковые волны одинаковых частот. Если на выходе из первой ячейки дифрагированная и непродифрагированная части излучения имеют одинаковые направления, то для того, чтобы на вторую ячейку попадала только дифрагированная часть между ячейками, вставляют поляризатор. Если же дифрагированная и непродифрагированная части излучения имеют разные направления, то этого добиваются путем геометрического расположения ячеек [5, 7, 10].

В данной работе основное внимание уделено разработке устройства усиления мощности, входящего в состав двойного АО-монохроматора (ДАОМ) [4, 5]. Для работы этого устройства необходим высокочастотный аппаратный драйвер, обеспечивающий подачу на ультразвуковые преобразователи сигнала требуемой мощности, для создания ультразвуковых колебаний нужной амплитуды в АО-ячейках монохроматора. Создаваемая при этом объемная решетка, на которой происходит дифракция заданной спектральной составляющей оптического излучения, должна быть одинаковой в обеих АО-ячейках. Для одинаковости ячеек они могут быть изготовлены из одного монокристалла [4–7]. В этом случае ячейки могут быть подключены к аппаратному драйверу, содержащему один синтезатор частоты и делитель мощности между ультразвуковыми преобразователями ячеек.

В случае невозможности изготовления ячеек из одного монокристалла или при недостаточной точности изготовления ячеек потребуются для совмещения их аппаратных функций синтез сигналов разных частот и отдельное усиление мощности сигналов. В качестве дополнительного преимущества при этом появляется возможность независимого управления коэффициентом передачи.

Для реализации этих целей был разработан макет ВЧ-усилителя мощности, рис. 2. Его максимальная усиливаемая мощность до 1 Вт, коэффициент усиления по напряжению до 17 дБ, что вполне достаточно для усиления выходного сигнала синтезатора частоты [11], разработанного в НТЦ УП РАН. Необходимая амплитуда после усиления сигнала с синтезатора должна быть от 2 до 7 В (для обеспечения желаемой мощности). Питание устройства осуществляется от источника постоянного напряжения 7 В. Внешний вид разработанного макета печатного узла ВЧ-усилителя и синтезатора частоты представлен на рис. 3.

При проектировании макета печатного узла ВЧ-усилителя мощности необходимо учесть дополнительные требования, которые предъявляются к разрабатываемому устройству:

- 1) возможность работать с нагрузкой 50 Ом;
- 2) устройство должно допускать согласование на почти емкостную нагрузку для возможности преобразования в звуковую волну согласующим устройством (в АО-спектрометре);
- 3) коэффициент усиления по напряжению должен быть примерно одинаковым во всей рабочей полосе частот устройства – от 50 до 200 МГц;
- 4) относительно небольшие габариты.

При разработке устройства за основу были взяты биполярный ВЧ-транзистор BFG541 и полевой транзистор NE5510279A, которые обладают суммарной рассеиваемой мощностью 2 Вт и верхней частотной границей рабочего диапазона до 1.8 ГГц, что вполне достаточно для выполнения поставленной задачи. Была разработана принципиальная электрическая схема, состоящая из двух транзисторных каскадов: в первом каскаде транзистор BFG541 включен по схеме с общим эмиттером для усиления амплитуд напряжения и тока, во втором каскаде транзистор NE5510279A включен



Рис. 3. Внешний вид макета ВЧ-усилителя и синтезатора частоты.

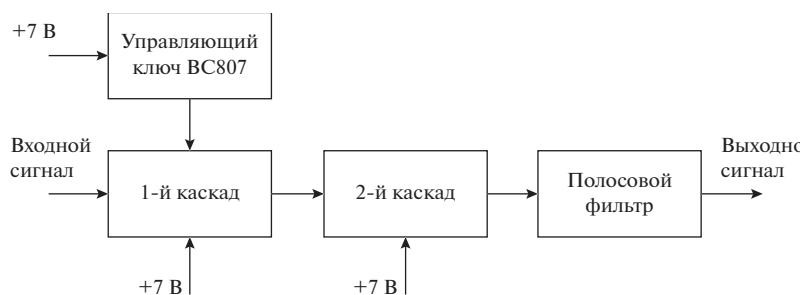


Рис. 4. Структурная электрическая схема усилителя мощности.

по схеме с общим истоком также для усиления тока и напряжения. Помимо этого предусмотрен ключ из биполярного транзистора ВС807 для включения/выключения первого каскада, что позволяет менять уровень мощности сигнала. Структурная электрическая схема усилителя мощности представлена на рис. 4.

Были рассчитаны соответствующие значения сопротивлений цепей коллектора и эмиттера, а также делителя напряжения для требуемого режима работы усилителя. Затем электрическая схема была промоделирована в программе схемотехнического проектирования PSpice, что позволило точно рассчитать значение резисторов, индуктивности и емкости для разработанного усилителя и получить амплитудно-временные и амплитудно-частотные характеристики (АЧХ) напряжения. Частотная характеристика усилителя, полученная в результате моделирования, представлена на рис. 5.

Затем был проведен эксперимент (рис. 6) по анализу характеристик выходного сигнала ВЧ-усилителя, на который в свою очередь подавался не усиленный сигнал с синтезатора частоты (см. рис. 2). Управление двухканальным синтезатором частоты (вводом желаемой частоты) осуществлялось

пользователем с компьютера через последовательный порт (используется служебная программа TeraTermPro для работы с терминалами по протоколам). Далее сигнал наблюдали на осциллографе.

Необходимо отметить, что особенностью разработанного усилителя является возможность изме-

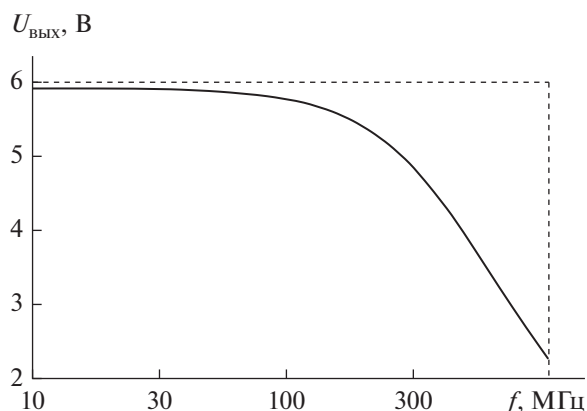


Рис. 5. Расчетная частотная зависимость максимально реализуемой амплитуды выходного сигнала от частоты.

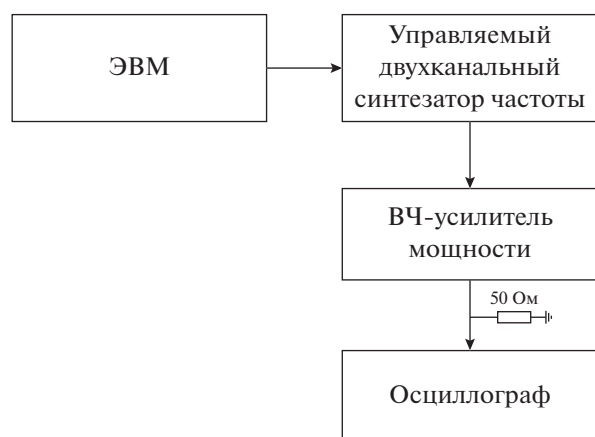


Рис. 6. Схема эксперимента.

нять коэффициент усиления за счет использования последовательно включенных чип резисторов в цепи коллектора и эмиттера, однако данная регулировка (подстройка) осуществляется после соответствующих расчетов сопротивлений эмиттера и коллектора для более точного выбора рабочей точки транзистора. Предлагаемое усовершенствование применимо для достижения более сбалансированной работы с широкополосным синтезатором частоты, так как при использовании синтезатора на определенной полосе частот наблюдались отклонения амплитуды выходного сигнала от желаемой нормы 1 В (изменения были 0.6...2 В), но, используя предусмотренную регулировку резисторами, этого можно избежать. На рис. 7 представлен пример выходного сигнала на частоте 120 МГц (осциллограф), показывающий удовлетворительное качество сигнала.

Разработанное устройство обладает следующими характеристиками:

– выходная мощность	до 1 Вт
– частотный диапазон	30...200 МГц
при неравномерности АЧХ в 3 дБ	
– коэффициент гармонических искажений	0.001%
– отношение сигнал/шум	95 дБ
– габариты печатной платы	50 × 30 мм

По результатам проделанной работы можно сделать следующие выводы.

1. Разработана топология печатной платы ВЧ-усилителя мощности для совместного использования с широкополосным синтезатором частоты, а также в качестве самостоятельного устройства.

2. Устройство позволяет регулировать коэффициент усиления, что необходимо для автоматической подстройки нужного значения амплитуды выходного сигнала при изменении частоты с целью повышения точности спектральных измерений.

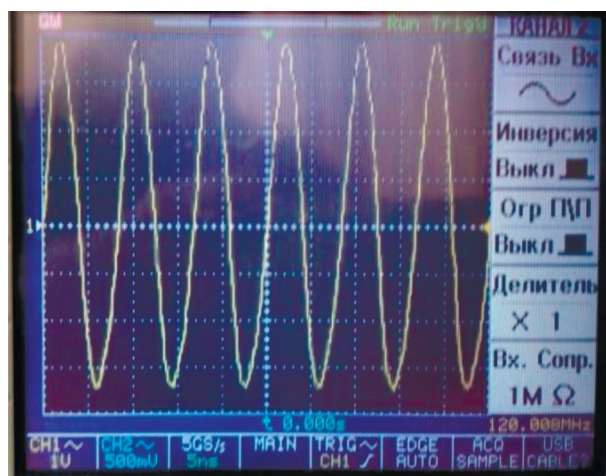


Рис. 7. Фотография выходного сигнала ВЧ-усилителя на осциллографе.

3. Высокая эффективность устройства позволяет настраивать коэффициент усиления даже до амплитуды напряжения питания.

4. Максимально предельная допустимая рабочая температура использованного в схеме транзистора BFG541 равна 150°C, что положительно скажется на температурной стабильности всего устройства.

5. За счет реализации обратной связи возможно усовершенствование разработанного макета, что позволит автоматически подстраивать коэффициент усиления до нужного значения.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Pustovoyt V.I.* // Optical Memory and Neuron Networks (Information Optics). 2004. V. 13. № 2. P. 71.
2. *Joshi J.C.* Acousto-optic Devices and Their Defense Applications. Delhi: Defense Scientific Information and Documentation Center, 2007.
3. *Жогун В.Н., Пустовойт В.И., Тябликов А.В.* // Электронная техника. 1990. Сер. 3. Микроэлектроника. В. 2. С. 136.
4. *Мазур М.М., Шорин В.Н., Чижиков С.И., Леонов С.А.* // Оптика и спектроскопия. 1989. Т. 67. № 3. С. 736.
5. *Мазур М.М., Шорин В.Н., Абрамов А.Ю. и др.* // Оптика и спектроскопия. 1996. Т. 81. № 3. С. 521.
6. *Мазур М.М.* // Акустооптические, акустические и рентгеноспектральные методы и средства измерений в науке и технике. Сб.науч. тр. ВНИИФТРИ. Менделеево: ВНИИФТРИ, 2005. В. 48. С. 48.
7. *Мазур М.М., Судденко Ю.А., Шорин В.Н.* // Письма в ЖТФ. 2014. Т. 40. № 4. С. 56.
8. *Kramer H.J.* Observation of the Earth and its Environments: Survey of Missions and Sensors. Berlin: Springer, 2002. P. 1233.
9. *Пустовойт В.И., Тимошенко В.В.* // РЭ. 1998. Т. 43. № 4. С. 461.
10. *Мазур М.М., Мазур Л.И., Пустовойт В.И. и др.* // ЖТФ. 2017. Т. 87. № 9. С. 1399.
11. *Мартыанов П.С.* // РЭ. 2018. Т. 63. № 11. С. 1197.