

**АКУСТООПТИЧЕСКИЙ СПЕКТРОГРАФ  
ДЛЯ РАДИОТЕЛЕСКОПА РАТАН-600  
НА ОСНОВЕ КРИСТАЛЛА  $\text{TeO}_2$**

*Е. Т. Аксенов, В. Г. Грачев, С. В. Прусс-Жуковский,  
А. И. Шишкин, А. В. Михайлов, А. С. Щербаков,  
В. А. Винокуров, В. М. Грика, М. Г. Сербуленко*

Разработан акустооптический спектрограф с ультразвуковым модулятором света из парателлурита  $\text{TeO}_2$ . Полоса одновременного спектрального анализа составляет 28 МГц, частотное разрешение равно  $\sim 60$  кГц. Проведены лабораторные исследования и испытания в составе радиоспектрометра на радиотелескопе РАТАН-600.

The acousto-optical spectrograph with ultrasonic light modulator on  $\text{TeO}_2$  has been constructed. The simultaneous analysis band is 28 MHz, the spectral resolution is 60 KHz. The laboratory investigations and the test with radiospectrometer on the radio telescope RATAN-600 have been carried out.

Созданные в последнее время акустооптические спектрографы [1—3] являются весьма перспективными системами для применения в радиоастрономии. Такие спектрографы имеют простую конструкцию и позволяют получать широкие полосы анализа при большом числе частотных каналов. Параметры легко изменяются путем простой замены акустооптического модулятора. Поэтому акустооптические спектрографы могут использоваться как для исследования различных известных в настоящее время радиолиний, так и для обнаружения новых спектральных линий в радиодиапазоне. В частности, для наблюдения на радиотелескопе РАТАН-600 спектральных линий возбужденного водорода необходимы спектрографы с полосой анализа около 30 МГц и частотным разрешением порядка нескольких десятков килогерц. Нами разработан акустооптический анализатор спектра для таких спектрографов на основе кристалла  $\text{TeO}_2$ . Настоящая статья посвящена описанию такого анализатора спектра и результатов его исследования. В ней приводится также разработанная нами технология изготовления акустооптических модуляторов из  $\text{TeO}_2$ .

Параметры акустооптических анализаторов спектра, такие как полоса анализа и частотное разрешение, определяются в основном характеристиками акустооптического модулятора света: размерами кристалла, его оптическим качеством, скоростью звука в звукопроводе модулятора, затуханием упругой волны. Для широкополосных анализаторов спектра необходимо использовать твердотельные модуляторы со звукопроводами из стекол или кристаллов, так как жидкостные модуляторы из-за большого затухания звука на частотах выше 30 МГц не могут обеспечить полосу анализа более 10 МГц. Одним из наиболее перспективных материалов для создания модуляторов света является кристалл парателлурита ( $\text{TeO}_2$ ), который имеет очень малую скорость звука  $v=0.62 \cdot 10^3$  м/с в направлении [110], что позволяет при небольшой апертуре получать высокое частотное разрешение [4].

Нами был разработан акустооптический модулятор света на основе кристалла  $\text{TeO}_2$ . При разработке модулятора необходимо было получить

полосу анализа 25—30 МГц. Центральная рабочая частота была выбрана равной 65 МГц.

Кристаллы  $\text{TeO}_2$  были выращены в Институте геологии и геофизики СО АН СССР. Там же отбирался кристаллический материал и изготовлялся светозвукопровод.

Для обеспечения высокого оптического качества кристаллический материал проверялся на бессвильность, пузырность и включения, проверялось светопропускание и разрешение методом «мир» абсолютного контраста, отдельно в обыкновенной и необыкновенной волне, измерялась величина упругих напряжений методом «остаточного света», исключалось наличие малоугловых границ методом «точечной коноскопии» [5].

Был выбран образец, из которого изготовлен светозвукопровод с разрешением 1.00 в обыкновенной и необыкновенной волне, величиной



Рис. 1.

остаточного света, равной 0.5% в центре апертуры и до 1% на краях апертуры. Свили, пузыри, включения и малоугловые границы отсутствовали.

Пьезопреобразователь модулятора представлял собой пластину ниобата лития  $\text{LiNbO}_3$   $x$ -среза. Преобразователь крепился к звукопроводу с помощью медь-индиевого связующего слоя методом термокомпрессии [6]. Толщина связующего слоя 4 мкм, что соответствует четверти длины акустической волны в материале связки. После крепления к звукопроводу толщина преобразователя шлифовкой доводилась до полуволновой, равной 34 мкм.

Для создания в звукопроводе модулятора режима бегущей волны торец звукопровода, противоположный преобразователю, скашивался под углом  $\sim 3^\circ$ , и к нему с помощью индиевого связующего слоя крепился свинцовый акустический поглотитель. Для использования модулятора в автоколлимационной системе на одну из его рабочих граней методом вакуумного термического напыления было нанесено алюминиевое зеркальное покрытие. Затем на все нерабочие грани звукопровода был напылен слой индия толщиной  $\sim 5$  мкм, что позволило избавиться от паразитных отражений акустической волны. Изготовление модулятора заканчивалось нанесением верхнего медь-индиевого электрода пьезопреобразователя. Электрод имел размеры  $4 \times 5$  мм<sup>2</sup>. Модулятор и согласующая индуктивность, включенная параллельно пьезопреобразователю, монтировались в специальной оправе. Измеренные параметры модулятора: центральная рабочая частота — 65 МГц, полоса пропускания по уровню — 3 дБ — 28 МГц, частотное разрешение  $\sim 60$  кГц, число разрешимых точек  $\sim 460$ .

На рис. 1 приведена блок-схема акустооптического спектрографа. Исследуемый сигнал с выхода спектрального приемника или имитатора

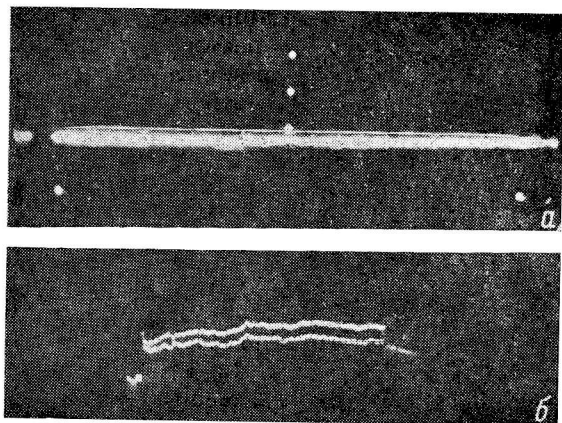


Рис. 2.

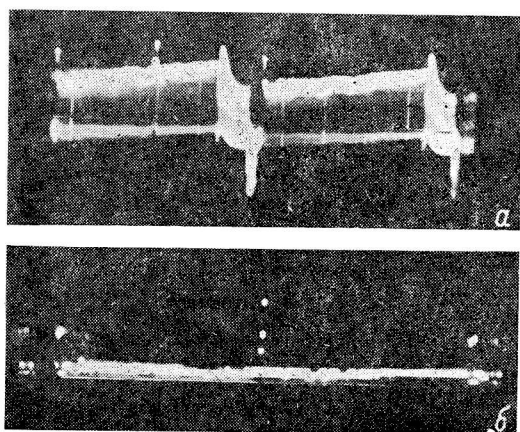


Рис. 3.

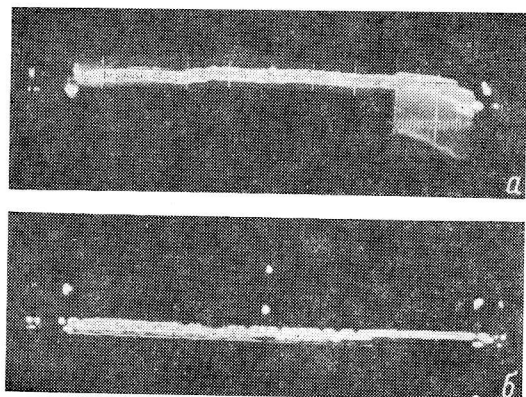


Рис. 4.

через усилитель поступает на вход анализатора спектра. Акустооптический анализатор спектра выполнен на основе автоколлимационной оптической системы, особенности которой рассматривались нами ранее [3]. Связь оптической и цифровой частей спектрографа осуществляется с помощью линейки ПЗС. Для наиболее полного использования возможностей оптической системы, обеспечивающей полосу анализа, равную 28 МГц, и частотное разрешение 60 кГц, необходима линейка ПЗС с числом элементов  $\sim 1000$ . В этом случае каждому элементу частотного разрешения соответствуют два элемента линейки ПЗС при частотном интервале между соседними элементами, равном 30 кГц. В связи с отсутствием у нас такой линейки использовалась линейка ПЗС из 512 элементов, и был выбран компромиссный частотный интервал 40 кГц между соседними элементами линейки, что дало возможность проводить спектральный анализ сигналов в полосе  $\sim 20$  МГц.

В цифровой части спектрографа используется ЭВМ «Электроника-100И». Обработанная информация из ЭВМ передается во внешние устройства накопления и отображения: магнитофон, дисплей и др. Спектрограф работает в модуляционном режиме [7]. Частота модуляции  $f_{\text{мод}}$  равна 25 Гц. Время накопления сигналов в линейке ПЗС равно  $\tau_1 = 1/2f_{\text{мод}} = 20$  мс, а полное время интегрирования в ЭВМ  $\tau_2$  равно 3 с. Следует отметить, что эти величины задаются от ЭВМ и могут легко изменяться программным путем. Величина радиометрического выигрыша [8] в каждом эквивалентном

частотном канале при указанных выше параметрах спектрографа составляет  $\sim 420$ .

Для проведения лабораторных исследований характеристик спектрографа был разработан специальный имитатор сигналов, позволяющий подавать на вход анализатора модулированный шумовой сигнал, а также сигналы, имитирующие узкополосные спектральные линии. На рис. 2 приведены осциллограммы выходных сигналов линейки ПЗС для узкополосного (рис. 2, а) и шумового сигналов (рис. 2, б) на входе акустооптического анализатора спектра. На рис. 2, б видно различие электрических параметров выводных регистров использовавшейся нами линейки ПЗС. Следующие фотографии иллюстрируют работу спектрографа в модуляционном режиме. На рис. 3, а показаны осциллограммы выходных сигналов линейки ПЗС в соседних полупериодах модуляции. В первом полупериоде, соответствующем режиму «антенна», виден узкополосный сигнал на фоне широкополосного шума, соответствующего шумам приемника. На втором полупериоде (режим «эквивалент») видны только шумы приемника. На рис. 3, б виден узкополосный сигнал на выходе спектрографа, выделенный путем усреднения за трехсекундный интервал разности «антенна—эквивалент». Эта операция реализует процесс синхронного детектирования с последующим накоплением сигнала с помощью идеального интегратора. На рис. 4, а показан сигнал на выходе линейки ПЗС в присутствии узкополосного сигнала, уровень которого значительно ниже уровня шума, а на рис. 4, б представлен выделенный после обработки в ЭВМ узкополосный сигнал.

Акустооптический спектрограф с модулятором света на основе  $\text{TeO}_2$  испытывался совместно со спектральным приемником на радиотелескопе РАТАН-600. Исследования показали, что спектрограф обеспечивает близкие к расчетным параметры и после проведения некоторых конструктивных доработок может быть использован в составе комплекса спектральной аппаратуры РАТАН-600.

Авторы выражают благодарность Н. А. Есепкиной, А. А. Годовикову и Г. В. Букину за постоянное внимание к работе, а также С. Р. Желенкову и А. С. Морозову за помощь в разработке и испытаниях спектрографа.

#### Список литературы

1. Cole T. W. Electrooptical processing in radio astronomy. — *Optica Acta*, 1975, 22, 2, p. 83.
2. Kaifu N., Ukita N., Chikada Y., Mijaju T. A high-resolution acousto-optical radiospectrograph meter for millimeter wave astronomy. — *Publ. Astron. Soc. Japan*, 1977, 29, p. 420.
3. Есепкина Н. А., Котов Б. А., Котов Ю. А., Рыжков Н. Ф., Михайлов А. В., Прусс-Жуковский С. В., Шишкин А. И. Акустооптический спектрограф для радиотелескопа РАТАН-600. — *Письма в ЖТФ*, 1979, 5, 9, с. 556.
4. Ушида Н., Ниндзэки Н. Материалы и методы акустооптического отклонения. — *ТИИЭР*, 1973, 61, 8, с. 21.
5. Сербуленко М. Г., Грика В. М. Прецизионная ориентировка кристаллов, визуализация и измерение углов оптических осей блоков при помощи коноскопии с точечным источником. — *ДАН*, 1980, 251, № 6.
6. Аксенов Е. Т., Щербakov А. С. Акустооптический коррелятор на основе коллинеарного взаимодействия упругих волн в кристалле молибдата свинца. — *Письма в ЖТФ*, 1980, 6, 1, с. 18.
7. Есепкина Н. А., Котов Ю. А., Михайлов А. В., Прусс-Жуковский С. В., Рыжков Н. Ф. Акустооптический спектрограф для радиоастрономии. — *Письма в АЖ*, 1978, 4, 11, с. 523.
8. Есепкина Н. А., Корольков Д. В., Парийский Ю. Н. Радиотелескопы и радиометры. — М., «Наука», 1973.