

УДК 523.9, 520.24, 535.339.3

## Электрооптические модуляторы ИСЗФ для наблюдений магнитных полей на Солнце

*Л.С. Токарева, В.И. Скоморовский, Г.И. Кушталъ*

Институт солнечно-земной физики СО РАН, Иркутск, 664033, Россия  
*lopteva@mail.iszf.irk.ru*

Поступила в редакцию 28 сентября 2023 г.

**Аннотация.** Описаны основные этапы разработки в ИСЗФ СО РАН электрооптических модуляторов (ЭОМ) на кристаллах группы KDP для солнечных магнитографов. Исследованы оптико-физические характеристики модуляторов. Проанализированы причины выхода из строя ЭОМ и предложены способы их устранения. Разработаны конструкции ЭОМ для разных типов управляющих напряжений.

**Ключевые слова:** солнечный магнитограф, поляризация, эффект Поггеля, кристалл KDP

### 1 Введение

Общим методом, составляющим основу работы солнечного магнитографа, является измерение параметров поляризации излучения. Совершенствование методики измерений идет по пути создания новых анализаторов поляризованного света и способов управления ими. Анализаторы поляризованного света разрабатываются в ИСЗФ на основе модуляторов с использованием эффекта Поггеля в электрооптических кристаллах. Изменяя под воздействием приложенного напряжения поляризацию света, проходящего через кристалл, можно измерить все параметры Стокса, которые полностью описывают состояние поляризации поля излучения. Параметры поляризации на участке спектральной линии дают информацию о величине и направлении вектора магнитного поля на Солнце. Требования, предъявляемые к ЭОМ для наблюдения магнитных полей, касаются следующих параметров:

- пропускание,
- световой диаметр,
- обеспечение глубины модуляции светового пучка при управлении от источника синусоидального напряжения или от постоянного и знакопеременного импульсного напряжения,
- однородность сдвига фазы от управляющего напряжения по полю зрения модулятора,
- наведенное двойное преломление из-за механических напряжений в модуляторе,
- искажения волнового фронта оптического излучения по полю зрения,
- угловая апертура,
- возможность работы в условиях влажной атмосферы и перепадов температуры,
- стабильность эксплуатационных параметров.

Отечественная оптико-механическая промышленность не выпускает необходимых ЭОМ с параметрами, удовлетворяющими условиям наблюдений. С целью создания модуляторов, работающих в широком частотном диапазоне, сохраняющих качество волнового фронта оптического излучения и однородность фазового сдвига по апертуре, способных измерять степень поляризации с точностью  $1 \times 10^{-4}$  и выше в ИСЗФ с 1965 г. по настоящее время разрабатываются и испытываются различные конструкции ЭОМ для совершенствования их оптических и эксплуатационных характеристик. В работе проанализированы основные конструктивные особенности разработанных в ИСЗФ модуляторов, причины выхода их из строя и предложены технические решения, обеспечивающие стабильную работу ЭОМ и направленные на минимизацию ошибок магнитографических измерений.

## 2 Электрооптические модуляторы магнитографов для работы с аналоговым сигналом

Потребность в ЭОМ возникла с пуском первых солнечных магнитографов (Никулин и др., 1958; Кузнецов и др., 1966). Первый модулятор в ИСЗФ (в то время СибИЗМИР) был изготовлен В.Е. Степановым в 1965 году. Этот классический модулятор представлял собой плоскопараллельную пластинку электрооптического кристалла ADP (гидрофосфат аммония), вырезанную перпендикулярно оптической оси и заклеенную между двух защитных стекол с нанесенными на них прозрачными токопроводящими покрытиями, прилегающими к пластинке. В лаборатории института прозрачные токопроводящие электроды оксида олова  $\text{SnO}_2$  (рис. 1а) наносились методом пиролиза при высокой температуре  $430^\circ\text{C}$  на поверхность и фаску защитного стекла, токопроводящая паста вжигалась в фаску стекла, а высоковольтные выводы припаивались к пасте. Конструкция помещалась в корпус из оргстекла или фторопласта и заливалась канадским бальзамом или восковым компаундом (рис. 1б). Световой диаметр модуляторов 10–20 мм.

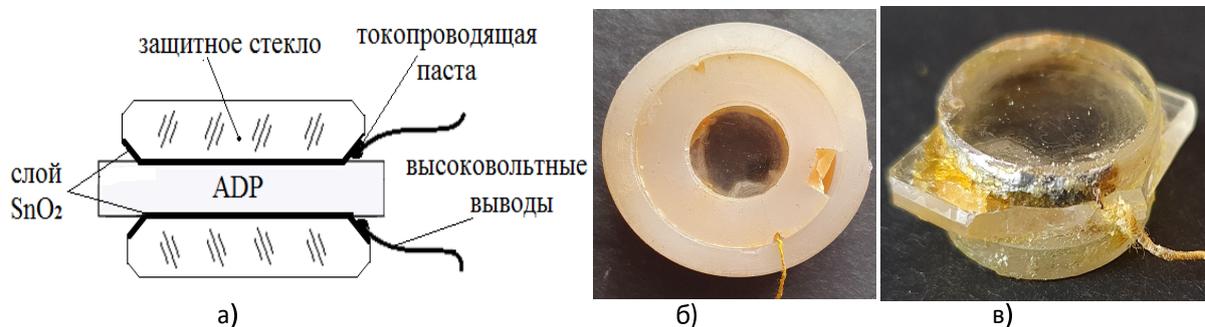


Рис. 1. Конструкция ЭОМ на кристалле ADP: а) схема, б) внешний вид, в) разрушенный модулятор

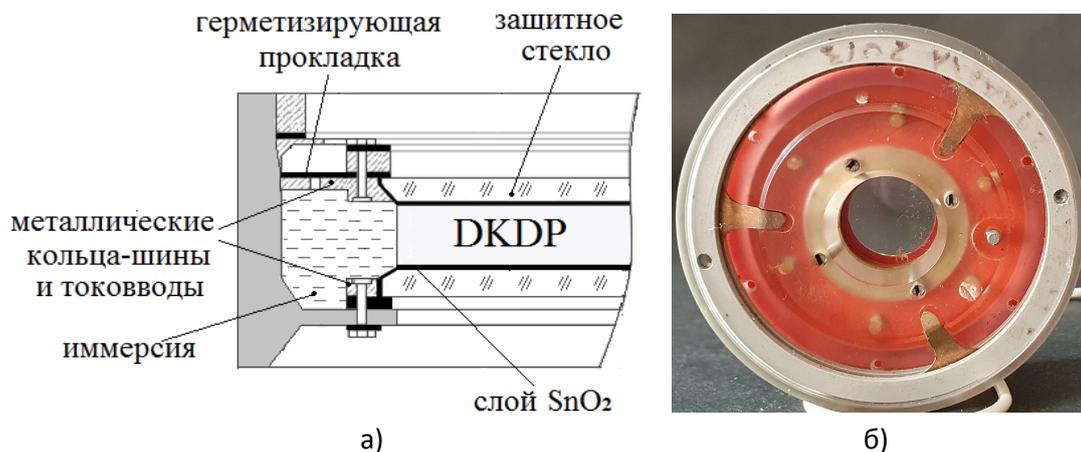


Рис. 2. Иммersionный ЭОМ: а) схема, б) внешний вид

Кристаллы ADP (и появившиеся позже кристаллы KDP, DKDP с более низким управляющим напряжением) в технологическом отношении очень delicate: мягкие – легко царапаются; водорастворимые – мутнеют во влажной атмосфере; имеют большой коэффициент расширения – трескаются при небольших перепадах температуры; разлагаются при температурах  $\sim 150\text{--}200^\circ\text{C}$ . Последнее не позволяло нанести токопроводящие покрытия и электроды прямо на кристалл.

Недостаток данной конструкции – отслоение токопроводящего покрытия под влиянием вибраций от пьезоэффекта, разрушение компаунда, разгерметизация блока и, как следствие, электрический пробой и разрушение кристалла (рис. 1в) (Марков и др., 1988).

В 1980 году было изменено устройство модулятора – переход от жесткой к эластичной конструкции. Электрооптический кристалл помещается в иммерсию между двумя защитными стеклянными пластинками с прозрачными токопроводящими покрытиями (рис. 2). Покрытия, как и прежде, наносились и на внутренние поверхности пластинок, и на фаски, к которым механически прижимались металлические токопроводящие кольца. Для предотвращения вытекания иммерсии кольца прикреплялись к несущим элементам корпуса через эластичные прокладки. Одно из колец со стеклом закреплялось в корпусе неподвижно, а вращением второго кольца изменялся зазор между оптическими элементами стопы. Вся стопа герметизировалась в корпусе прокладкой второго кольца с помощью прижимной втулки. По этой технологии были изготовлены модуляторы со световым диаметром 20–40 мм, а также ЭОМ со световым диаметром 100 мм, состоящий из четырех пластинок DKDP с общими токопроводящими стеклами. Этот модулятор (рис. 3) предназначался для установки перед объективом свободного от поляризации телескопа-рефрактора (Григорьев, Кобанов, 1980).

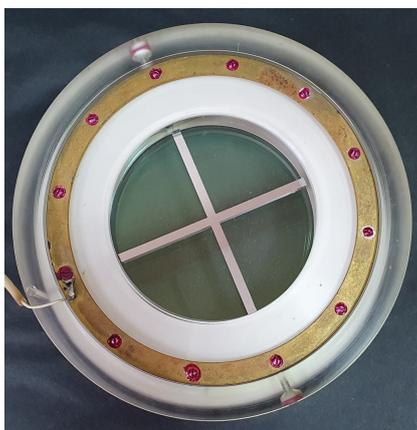


Рис. 3. Составной четырехкомпонентный ЭОМ

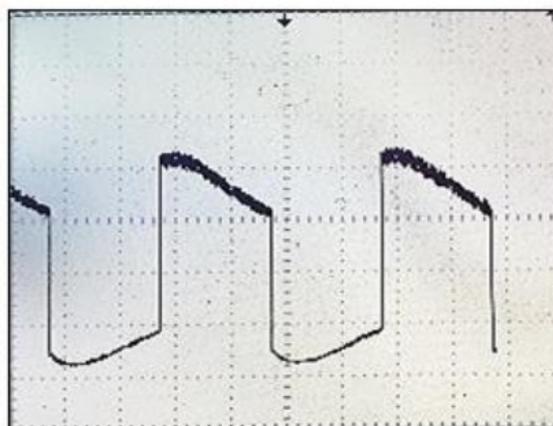


Рис. 4. Осциллограмма сигнала модулятора

Модуляторы данного типа хорошо работали с синусоидальным управлением напряжения, но при переходе на кодо-импульсное управление (Степанов и др., 1975; Григорьев, Кобанов, 1980) и низкие частоты модуляции форма сигнала искажалась (рис. 4). Этот недостаток связан с поляризуемостью слоя иммерсии, разделяющего поверхность кристалла и токопроводящее покрытие, – появляется несоответствие приложенного напряжения и действующего поля внутри кристалла (Марков и др., 1988). С уменьшением зазора между кристаллом и защитными стеклами с нанесенными токопроводящими покрытиями этот эффект уменьшается, но не исчезает.

### 3 Электрооптические модуляторы для работы магнитографов с кодо-импульсным управлением

С 2003 г. вместо  $\text{SnO}_2$  стали наносить прозрачный токопроводящий слой оксидов индия и олова (ИТО) непосредственно на поверхность кристалла в вакуумной установке при комнатной температуре магнетронным способом напыления (Бородин и др., 2003). Высоковольтные выводы прикреплялись токопроводящим клеем в одном участке прозрачного покрытия кристаллической пластинки (рис. 5).

Эксперименты подтвердили, что при нанесении электродов непосредственно на поверхность кристалла эффект поляризации иммерсии на всех частотах модуляции полностью отсутствует, что позволяет работать в широком диапазоне частот. На рис. 6 представлена осциллограмма сигнала модулятора с прямоугольной формой управляющего напряжения, искажений фронта сигнала нет.

Несмотря на то, что в оптических модуляторах нагрузка чисто емкостная, величина подводимых токов может стать значительной за счет крутизны фронтов, которую стремятся сделать как можно более высокой. Поэтому присоединение тоководов в одной точке нежелательно, так как это становится причиной разрушения покрытия из-за значительной плотности тока в точке контакта (рис. 7). Для предотвращения этого с 2008 года напряжение подводится к токопроводящему слою круглой

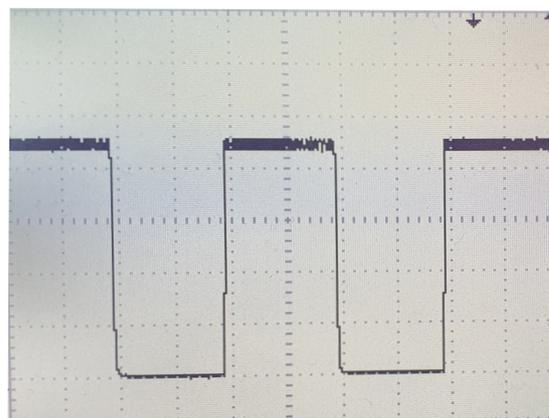
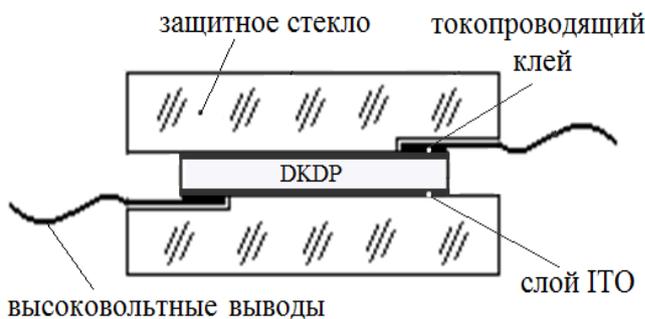


Рис. 5. Схема ЭОМ с токопроводящим покрытием на кристалле

Рис. 6. Оциллограмма сигнала модулятора

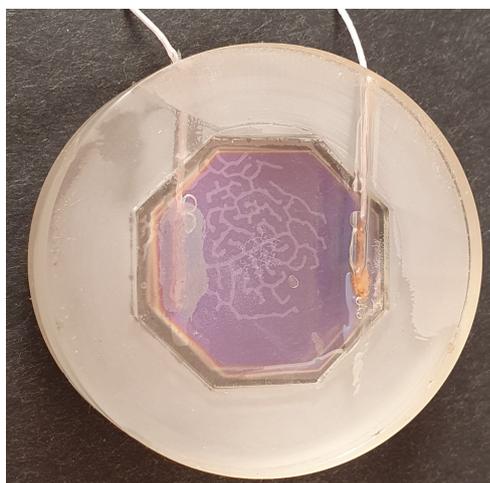


Рис. 7. Разрушения покрытия в ЭОМ



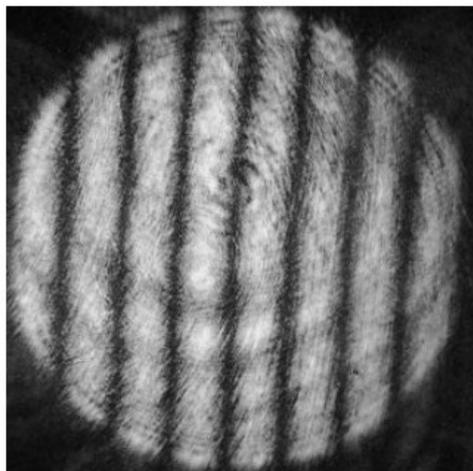
Рис. 8. Схема ЭОМ с подводом напряжения через индиевое кольцо

кристаллической пластинки по всему периметру металлическими кольцами, которые диффузно под давлением соединяются со слоем ИТО тонким индиевым кольцом (рис. 8) (Прошин и др., 2013).

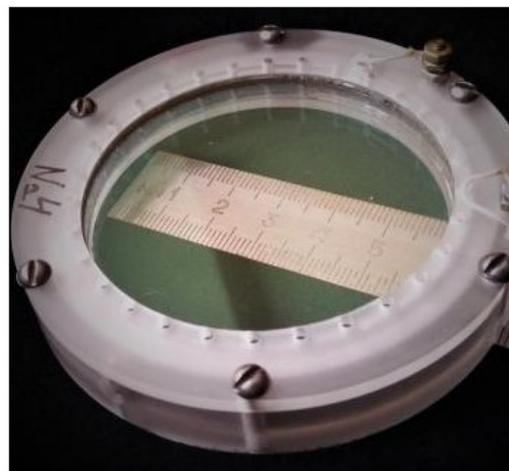
Модуляторы работают в широком диапазоне частот на импульсах прямоугольной формы без искажения волнового фронта и двойного преломления по всей своей апертуре (рис. 9). Для солнечного телескопа СОЛСИТ (Демидов и др., 2018) изготовлены такие модуляторы со световым диаметром 65 мм и толщиной 2 мм (рис. 10). Толщина кристалла определяет угловое поле модулятора, которое увеличивается с уменьшением толщины кристалла. Соответственно, толщина кристаллической пластинки сделана минимальной, около 2 мм, при которой еще не наступает электрический пробой пластинки от приложенного управляющего напряжения. При изготовлении модуляторов была усовершенствована технология обработки водорастворимых кристаллов для повышения чистоты поверхности и уменьшения рассеянного света.

В процессе длительной эксплуатации в ЭОМ стали появляться дефекты (рис. 11), которые вызывают рассеивание света и, как следствие, снижение полезного сигнала. Выяснено, что разрушения происходят не в самом кристалле, а в токопроводящей пленке ИТО. Дефекты можно разделить на два типа: разрушения, повторяющие слои роста кристалла (рис. 11а) и разрушения в виде островков различной формы (рис. 11б).

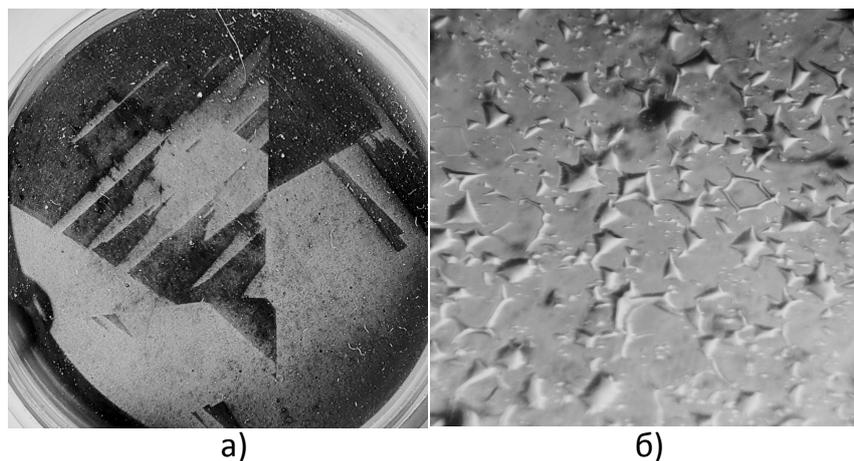
Причиной появления дефектов, вероятно, может быть кристаллизация аморфной пленки ИТО на кристаллической подложке и разрушение пленки ИТО под действием пьезоэффекта, которым обла-



**Рис. 9.** Интерференграмма волнового фронта модулятора Ø50 мм при приложенном напряжении



**Рис. 10.** Модулятор для СОЛСИТ



**Рис. 11.** Дефекты пленки ITO: а) разрушения в виде проявления слоев роста кристалла, модулятор Ø50 мм, без увеличения; б) разрушения в виде островков различной формы, участок модулятора Ø30 мм, семикратное увеличение

дает электрооптический кристалл. Для предотвращения появления этих дефектов предполагается нанесение прозрачного покрытия, которое защитит кристалл DKDP от влаги, а последующее покрытие ITO от кристаллизации и гетероэпитаксиального ориентирования атомов образовавшихся кристаллов и распада покрытия ITO на отдельные островки на поверхности кристалла DKDP.

#### 4 Заключение

После создания первого магнитографа полного вектора магнитного поля и начала регулярных наблюдений было организовано производство малой серии магнитографов на Опытном заводе СО РАН. В течение 1965–1970 гг. были изготовлены и поставлены магнитографы в зарубежные обсерватории (Чехословакия и ГДР), в обсерватории СССР (Абастуманская обсерватория, Астрономический институт в Алма-Ате, Уссурийская астрофизическая обсерватория, Шемахинская астрофизическая обсерватория). Эти и все последующие магнитографы для телескопов АСТ (Саянская солнечная обсерватория), СТОП (Саянская солнечная обсерватория, Байкальская астрофизическая обсерватория, Уссурийская астрофизическая обсерватория, Кисловодская Горная астрономическая станция),

СОЛСИТ (Байкальская астрофизическая обсерватория) были оснащены изготовленными в ИСЗФ электрооптическими модуляторами. Параметры модуляторов позволяют проводить магнитографические наблюдения при окружающей температуре от  $-25$  до  $+30$  °С с термическим “ударом” от нагрева в солнечном пучке и резким охлаждением, когда пучок уводится с модулятора, а также в условиях высокой влажности с использованием высокого управляющего напряжения.

Накопленный в ИСЗФ опыт позволил решить ряд технологических вопросов, направленных на улучшение эксплуатационных характеристик ЭОМ, и создает базу для разработки ЭОМ для крупного солнечного телескопа.

## Литература

- Бородин А.Н., Петров А.С., Домышев Г.Н. и др., 2003. Электрооптический фазовый модулятор. Патент RU 2248601 G02F 1/03. [Borodin A.N., Petrov A.S., Domyshev G.N., et al. 2003. Electro-optical phase modulator. Patent RU 2248601 G02F 1/03. (In Russ.)]
- Григорьев В.М., Кобанов Н.И., 1980. Исследования по геомагнетизму, аэронамии и физике Солнца. Т. 52. С. 155–176. [Grigoriev V.M., Kobanov N.I. 1980. Research on geomagnetism, aeronomy and solar physics, vol. 52, pp. 155–176 (In Russ.)]
- Демидов М.Л., Григорьев В.М., Ретюнский Л.Б. и др., 2018. Изв. Крымск. Астрофиз. Обсерв. № 2. С. 21–26. [Demidov M.L., Grigoriev V.M., Retyunsky L.B. and others. Izv. Krymsk. Astrofiz. Observ., vol. 2, .pp. 21–26 (In Russ.)]
- Кузнецов Д.А., Куклин Г.В., Степанов В.Е., 1966. Результаты наблюдений и исследований в период МГСС. Т. 1. С. 80–87. [Kuznetsov D.A., Kuklin G.V., Stepanov V.E. 1966. Results of observations and research during the MGSS period, vol. 1, pp. 80–87. (In Russ.)]
- Марков В.С., Домышев Г.Н., Скоморовский В.И. 1988. Исследования по геомагнетизму, аэронамии и физике Солнца. Т. 83. С. 141–149. [Markov V.S., Domyshev G.N., Skomorovsky V.I., 1988. Research on geomagnetism, aeronomy and solar physics, vol. 83, pp. 141–149. (In Russ.)]
- Никулин Н.С., Северный А.В., Степанов В.Е., 1958. Изв. Крымск. Астрофиз. Обсерв. Т. 19. С. 3–20. [Nikulina N.S., Severny A.V., Stepanov V.E., 1958. Izv. Krymsk. Astrofiz. Observ., vol. 19, pp. 3–20. (In Russ.)]
- Прошин В.А., Скоморовский В.И., Кушталь Г.И. и др., 2013. Электрооптический модулятор поляризованного излучения. Патент RU(11)130 094(13)U1. [Proshin V.A., Skomorovsky V.I., Kushtal G.I., et al., 2013. Electro-optical modulator of polarized radiation. Patent RU(11)130 094(13)U1. (In Russ.)]
- Степанов В.Е., Григорьев В.М., Кобанов Н.И., 1975. Исследования по геомагнетизму, аэронамии и физике Солнца. Т. 37. С. 147–153. [Stepanov V.E., Grigoriev V.M., Kobanov N.I., 1975. Research on geomagnetism, aeronomy and solar physics, vol. 37. pp. 147–153 (In Russ.)]

## Electro-optical ISTP modulators for solar magnetic field observations

*L.S. Tokareva, V.I. Skomorovsky, G.I. Kushtal*

Institute of Solar-Terrestrial Physics SB RAS, Irkutsk 664033, Russia  
*lopteva@iszf.irk.ru*

**Abstract.** The paper describes the main stages in developing electro-optical modulators (EOM) based on the KDP group crystals for solar magnetographs at ISTP SB RAS. The optical-physical characteristics of modulators have been studied. The reasons for the failure of the EOM are analyzed, and ways to eliminate them are proposed. The EOM designs have been developed for different types of control voltages.

**Key words:** solar magnetograph, polarization, Pockels effect, KDP crystal