

К. т. н. В. В. ДАНИЛОВ

Украина, г. Донецк, НИИ комплексной автоматизации

Дата поступления в редакцию  
06.07 1999 г.

Оппонент к. ф.-м. н. В. В. СТУПАКОВ

## КЛАССИФИКАЦИОННЫЙ АНАЛИЗ АКУСТООПТИЧЕСКИХ УСТРОЙСТВ УПРАВЛЕНИЯ ЛАЗЕРНЫМ ПУЧКОМ

*Обосновывается введение новых терминов и определений акустооптических устройств, в которых как базовый элемент выделена акустооптическая ячейка.*

Развитие лазерных технологий для оптоэлектронных систем предполагает наличие соответствующих элементов управления лазерным пучком. Попытки практически реализовать изделия такого функционального назначения в Украине предпринимались неоднократно [1–4]. Однако, как показал опыт их внедрения [5], процесс сдерживается отсутствием соответствующих нормативных документов, регламентирующих порядок их разработки и постановки на производство. Это вызвано рядом причин, основные из которых, по мнению автора, это — отсутствие доступных пониманию радиоинженера терминов и определений, надежно апробированных методик инженерного проектирования, в т. ч. и с помощью ЭВМ, достаточно обоснованного минимума групп технических характеристик оценки эффективности изделий, методик метрологического контроля, технологических приемов изготовления и т. д.

Согласно ГОСТ 24375–80, термин «модуляция» трактуется как процесс изменения одного или нескольких параметров несущей (поднесущей) в соответствии с изменениями параметров передаваемого сигнала или других сигналов, воздействующих на нее. Другой нормативный документ, ГОСТ 15093–75, дает трактовку термина «лазерное модуляционное устройство» как устройства управления лазерным излучением, предназначенного для изменения по заданному закону во времени и (или) в пространстве одного или нескольких параметров лазерного излучения или его положения.

Параметры лазерного излучения, которые изменяются в процессе его модуляции, предлагается (по аналогии) называть *информационными*.

Информационными параметрами когерентного оптического излучения, по-видимому, являются независимые параметры плоской монохроматической волны [6]: амплитуда напряженности поля, частота изменения поля во времени, вид поляризации, направление вращения поляризации, начальная фаза колебаний, направление распространения волны, азимутальный угол направления распространения, угол

направления распространения в вертикальной плоскости. Тогда, очевидно, по типу изменяемого информационного параметра модуляторы когерентного излучения оптического диапазона могут различаться как *амплитудные, частотные, фазовые, поляризационные* и — не имеющие аналога в радиоэлектронике — *направления* (дефлекторы). Предложенная автором классификация таких модуляторов оптического диапазона приведена на **рис. 1**.

Наиболее широкое применение нашли электро-, магнито- и акустооптические модуляторы. В оптоэлектронных системах обработки радио- и оптических сигналов, системах оптической памяти и вычислительной техники в подавляющем большинстве применяются акустооптические устройства (АОУ) управления лазерным пучком.

Физические основы и основы построения приборов акустооптики рассмотрены в [7–10]. В соответствии с ГОСТ 24453–80 акустооптический эффект определен как изменение показателя преломления вещества под действием *акустических колебаний*. По мнению автора, это определение было бы полнее, если следовать работам [7, 10], где акустооптический эффект определен как изменение показателя преломления сред под действием *упругих волн*, обусловленное фотоупругим эффектом.

Единым базовым элементом любого АОУ является акустооптическая ячейка (АОЯ), в состав которой входят электроакустический преобразователь (ЭАП), среда акустооптического взаимодействия (АОВ) — светозвукопровод (СЗП) и поглотитель упругих колебаний — акустическая нагрузка (**рис. 2**). Конструктивные элементы АОУ показаны на **рис. 3** (здесь элементы АОЯ: ВнешЭ — внешний электрод, ПЭ пластина — пьезоэлектрическая пластина, ВнЭ — внутренний электрод, элемент АС — элемент акустической связи, ПП — просветляющее покрытие, ПАЭ — поглощение акустической энергии, АП — акустический поглотитель). Модуль обеспечения эксплуатационной стабильности и АОЯ конструктивно объединены. В акустооптической ячейке выделяются узлы ЭАП, АОВ и ПАЭ. Модуль возбуждения ЭАП может быть как объединенным с АОЯ, так и пространственно разнесенным — в зависимости от конструктивных особенностей прибора. Предлагаемые классификационные признаки АОЯ приведены на **рис. 4**.

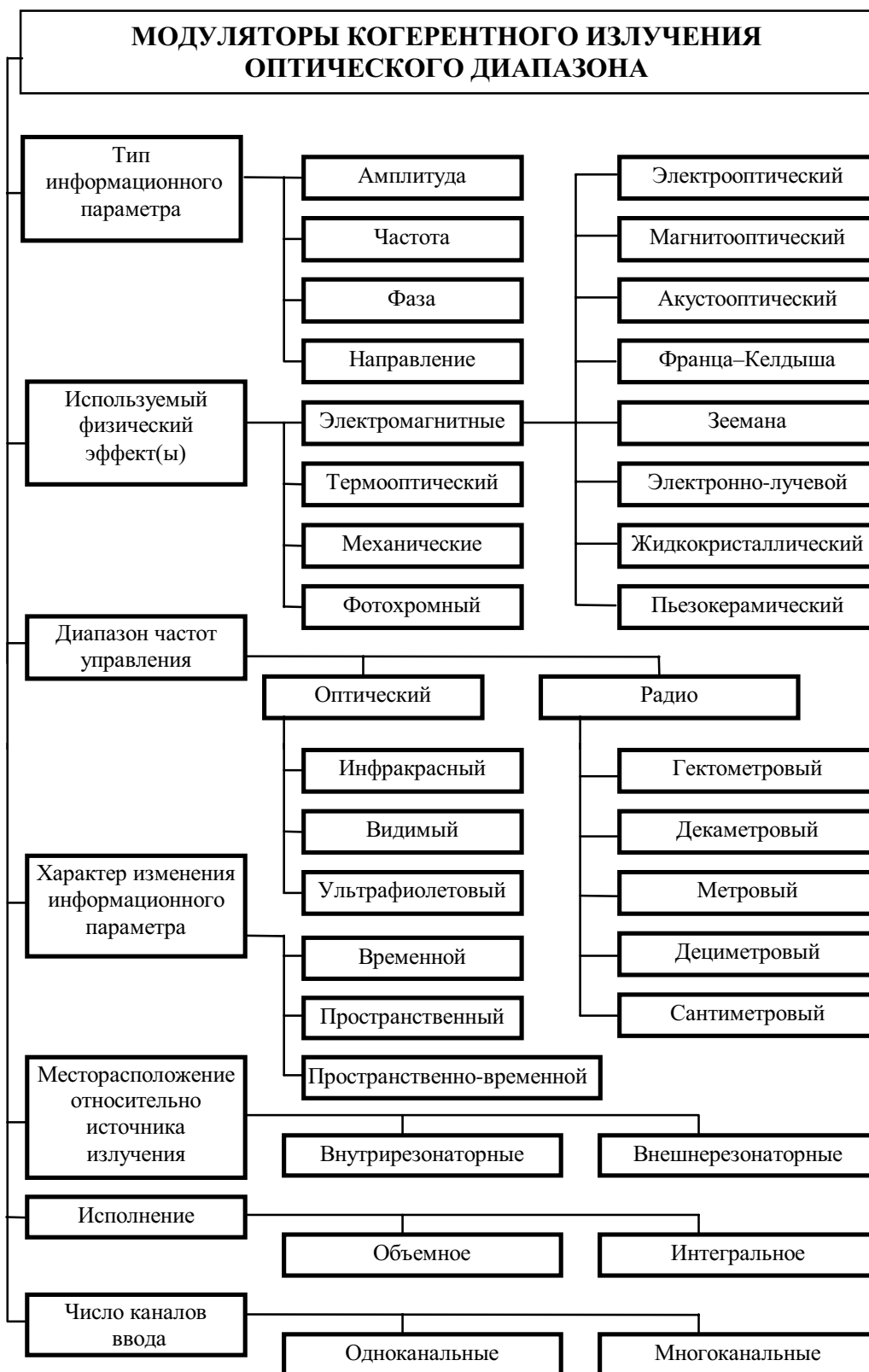


Рис. 1. Классификация модуляторов когерентного излучения оптического диапазона

## КОМПОНЕНТЫ ДЛЯ ЭЛЕКТРОННОЙ АППАРАТУРЫ

Рис. 2. Структура акустооптической ячейки

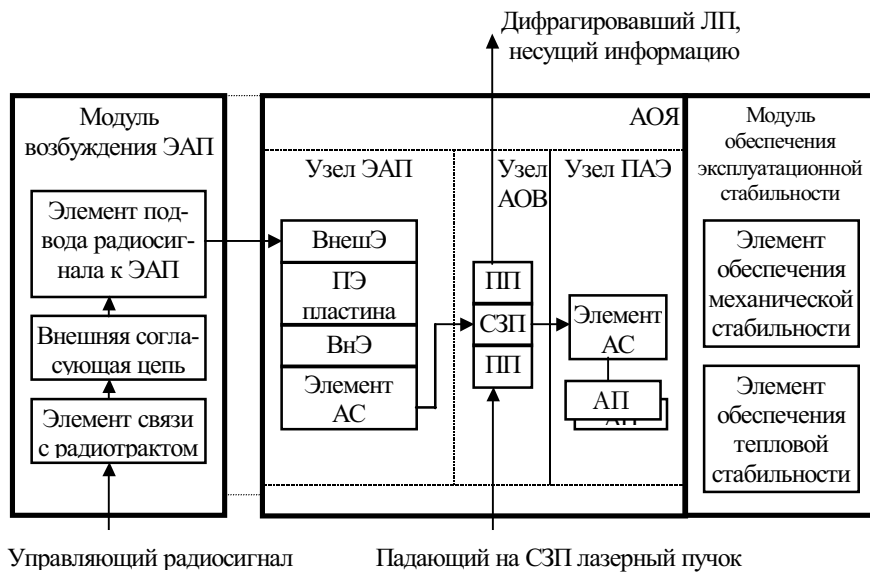
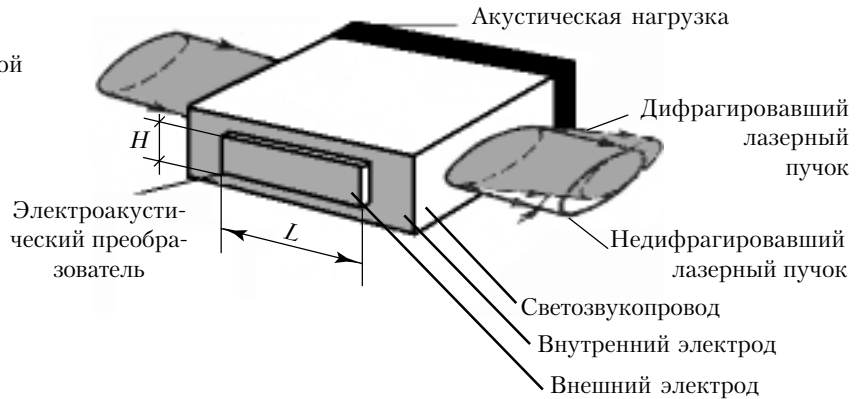


Рис. 3. Конструктивные элементы акустооптического устройства

Основным видом модуляции когерентного излучения, реализуемого с помощью АОЯ, является фазовая модуляция, индекс которой при АОВ определяется выражением

$$a_0 = \frac{\pi}{\lambda \cos \Theta_B} \sqrt{P_a M_2 \frac{L}{2H}}, \quad (1)$$

где  $\lambda$  — длина волны лазерного пучка в вакууме;  
 $\Theta_B$  — угол падения лазерного пучка на акустический (в радианах);  
 $P_a$  — часть активной мощности акустической волны, возбуждаемой ЭАП, участвующая в акустооптическом взаимодействии в СЗП;  
 $n$  — акустооптическая добротность среды;  
 $\rho$  — показатель преломления среды СЗП;  
 $V_a$  — фотоупругая постоянная среды СЗП;  
 $L$  и  $H$  — скорость акустической (упругой) волны в СЗП;  
 $L$  и  $H$  — длина и высота акустооптического взаимодействия (см. рис. 2).

Упругооптический эффект предполагает реализацию фотоупругих и дифракционных АОЯ. Чаще используются последние, различающиеся режимами дифракции. Для определения режима дифракции используется параметр Кляйна – Кука

$$Q_{\text{КК}} = \frac{2\pi\lambda L}{n\Lambda_B^2}, \quad (2)$$

где  $\Lambda_B$  — длина акустической волны на частоте, при которой углы падающей и дифрагировавшей оптических волн относительно нормали к фронту акустической волны равны.

При  $Q < 1$  распределение дифрагировавшего поля оптической волны на выходе АОЯ описывается отношением амплитуд вида

$$\dot{E}_1 = \dot{E}_\Pi J_1(a_0), \quad (3)$$

где  $\dot{E}_1$  и  $\dot{E}_\Pi$  — комплексные амплитуды поля световой волны в максимуме первого дифракционного порядка и в падающей на АОЯ оптической волне, соответственно. При этом режим дифракции получил название Рамана–Ната.

При  $Q > 10$  то же распределение имеет вид

$$\dot{E}_1 = \dot{E}_\Pi \sin(0,5a_0)^2. \quad (4)$$

Такой режим получил название режима Брэгга.

## КОМПОНЕНТЫ ДЛЯ ЭЛЕКТРОННОЙ АППАРАТУРЫ

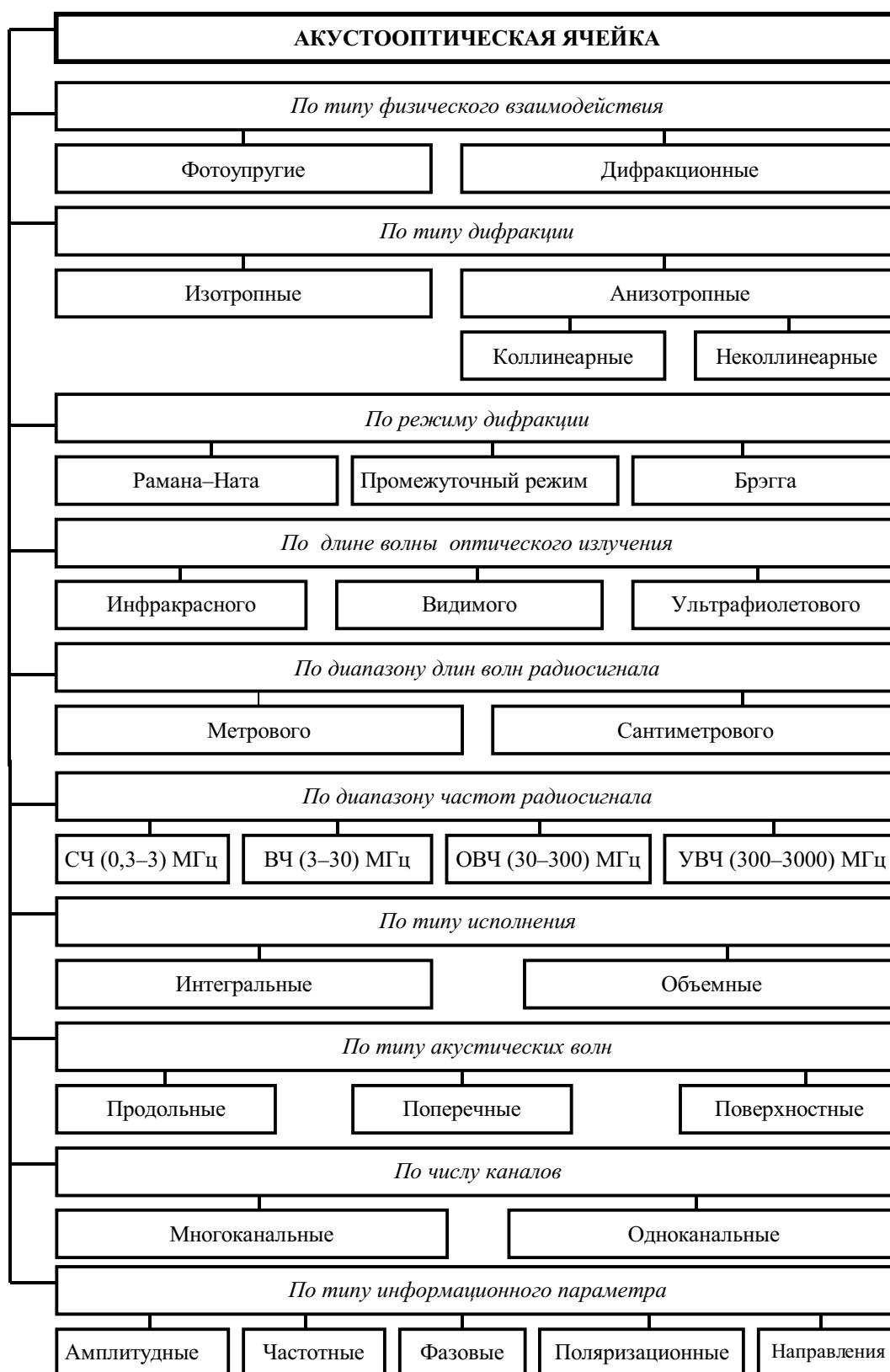


Рис. 4. Классификационные признаки акустооптической ячейки

Функция Бесселя первого рода и функция синуса могут быть представлены в виде степенных рядов, при этом общий вид выражения, объединяющего их:

$$R(a_0) = 0,5a_0 - c_3a_0^3 + c_5a_0^5 - c_7a_0^7 + \dots \quad (5)$$

Для режима Рамана-Ната  $c_3 = 0,0625$ ,  $c_5 = 2,604 \times 10^{-3}$ ,  $c_7 = 1,35 \times 10^{-5}$ ; для режима Брэгга  $c_3 = 0,0208$ ,  $c_5 = 0,25 \times 10^{-3}$ ,  $c_7 = 0,0387 \times 10^{-5}$ .

Оценки показывают, что при  $a_0 < 0,5$  для любых  $Q_{\text{КК}}$  отношения амплитуд вида (3) и (4) хорошо аппроксимируются первым членом ряда (5), причем ошибка составляет менее 3%. В этом случае говорят о линейной амплитудной характеристике АОЯ и о линейном характере акустооптического взаимодействия. Тогда при малых индексах фазовой модуляции, независимо от режима дифракции, интенсивность света в первом дифракционном максимуме равна

$$I_1 = I_{\text{п}}(0,5a_0)^2, \quad (6)$$

где  $I_1$  и  $I_{\text{п}}$  — интенсивность лазерного пучка в первом дифракционном порядке и в падающем на светозвукпровод АОЯ.

Величину относительной интенсивности лазерного пучка в первом дифракционном максимуме, выраженную в процентах на единицу мощности акустической волны (%/мВт), предлагается назвать *акустооптической эффективностью*. Она описывается выражением

$$K_a = \frac{100I_1}{I_{\text{п}}P_a} = \frac{\pi^2 M_2 L}{2\lambda^2 H \cos^2 \Theta_{\text{Б}}} \quad (7)$$

*Электрооптической эффективностью*, т. е. реальной энергетической эффективностью АОЯ (%/мВт), предлагается считать величину, описываемую выражением вида

$$K_d = \frac{100I_1}{I_{\text{п}}P_0}, \quad (8)$$

где  $P_0$  — мощность, отдаваемая в согласующую цепь АОЯ источником управляющего радиосигнала.

Учитывая введенные величины  $K_a$  и  $K_d$ , частотную характеристику электрооптической эффективности (ЭОЧХ) определим как

$$K_d(\Omega) = K_a \prod_{i=1}^4 k_i(\Omega), \quad (9)$$

где  $k_1(\Omega)$  — частотная зависимость энергетической эффективности преобразования электромагнитной волны, возбуждаемой источником радиосигнала, в акустическую;

$k_2(\Omega)$  — частотная зависимость акустооптической эффективности, обусловленная механизмом акустооптического взаимодействия;

$k_3(\Omega)$  — частотная зависимость акустооптической эффективности, обусловленная затуханием акустической волны при распространении в СЗП;

$k_4(\Omega)$  — частотная зависимость диссипативных потерь в ЭАП и элементах узла электрического возбуждения ЭАП.

При проектировании АОЯ необходимо учитывать коэффициент передачи света светозвукпроводом, описываемый выражением

$$K_t = (1 - R^2) \exp(-K_{\lambda} l), \quad (10)$$

где  $R$  и  $K_{\lambda}$  — коэффициенты отражения и светопоглощения СЗП;

$l$  — толщина СЗП для проходящего лазерного пучка.

Применение формирующей (входной и выходной) линзовой оптики и просветляющих покрытий на СЗП при реализации конкретного АОУ на основе АОЯ требует учета световых потерь в них. Следовательно, общий коэффициент передачи света лазерного пучка будет:

$$K_t = K_{t1} K_{t2} \dots K_{tm}, \quad (11)$$

где  $K_{ti} = (1 - R_i^2) \exp(-K_{\lambda i} l_i)$  — коэффициент передачи света отдельных элементов оптического тракта.

Таким образом, с учетом введенных понятий коэффициент передачи акустооптической ячейки может быть определен как

$$K_T = K_d K_t. \quad (12)$$

Определив акустооптическую ячейку как базовый элемент акустооптических устройств, необходимо отметить следующее.

В оптоэлектронике традиционно используется терминология как радиоэлектроники, так и оптического приборостроения. В связи с этим при однозначном определении функционального назначения устройства управления лазерным пучком необходимо обозначить и целевое назначение системы. Предлагается для устройств управления лазерным пучком, принцип действия которых основан на акустооптическом эффекте, ввести следующие определения:

*акустооптический модулятор* — используется как элемент ввода информации в оптоэлектронные системы спектрального и корреляционного анализа радиосигналов, реализующий линейные преобразования энергии управляющего радиосигнала в энергию лазерного пучка, а частоты радиосигнала — в угол отклонения пучка;

*акустооптическая линия задержки* — используется как и акустооптический модулятор, но реализующая задержку энергии импульса лазерного пучка во времени по отношению к управляющему дискретному радиосигналу (радиоимпульсу);

*акустооптический затвор* — используется как элемент ввода информации в оптоэлектронные системы записи, хранения и считывания информации, реализующий преобразование энергии управляющего дискретного радиосигнала в энергию лазерного пучка, дискретного во времени и близкого по форме к прямоугольной;

*акустооптический дефлектор* — используется как и акустооптический затвор, но реализует непрерывное отклонение лазерного пучка при заданном уровне изменения его энергии на угол, пропорциональный непрерывно изменяющейся частоте управляющего радиосигнала;

*акустооптический сканер* — реализует дискретное отклонение лазерного пучка при заданном уровне отклонения его энергии в результате преобразования дискретно изменяющейся частоты радиосигнала.

Необходимо отметить, что на основе АОЯ, используя анизотропную дифракцию света на акустических волнах, можно реализовать так называемый *акустооптический фильтр*, предназначенный для селекции оптических сигналов при поступлении на вход управления соответствующих радиосигналов.

\*\*\*

Таким образом, основным базовым элементом акустооптических устройств управления лазерным пучком является акустооптическая ячейка, которой присущи все свойства, трактуемые термином «лазерное модуляционное устройство».

Конкретное название акустооптической ячейки, выполняющей функции лазерного модуляционного устройства, определяет целевое назначение системы, в которой она применяется.

#### ИСПОЛЬЗОВАННЫЕ ИСТОЧНИКИ

1. Андреев А. А., Данилов В. В., Гусев О. Б. и др. Акустооптический анализатор спектра // Приборы и техника эксперимента. — 1992. — № 6. — С. 205.

2. Данилов В. В., Белик Т. В., Деркаченко Е. В. и др. Лазерное модуляционное устройство // Там же. — 1992. — № 4. — С. 236–237.

3. Гриб Б. Н., Кондиленко И. И., Коротков П. А., Цяченко Ю. П. Электрооптические дефлекторы света. — Киев: Техніка, 1980.

4. Данилов В. В., Данилова Г. В., Белик Т. В., Плотниченко В. Г. Световодный ИК радиометр для медицинской диагностики // Тез. докл. VI Междунар. науч.-техн. конф. «ВОЛСПИ-95». — Запорожье, 1995. — С. 16–17.

5. Данилов В. В., Роганов Л. М., Чуркин А. В. Акустооптические элементы межблочной волоконно-оптической связи для высокопроизводительных вычислительных средств // Там же. — С. 32–35.

6. Кондратенков Г. С. Обработка информации когерентными оптическими системами. — М.: Сов. радио, 1972.

7. Клудзин В. В. Физические основы построения акустооптических устройств. — Л.: Ленингр. электротехнич. ин-т, 1980.

8. Балакший В. И., Парыгин В. Н., Чирков Л. Е. Физические основы акустооптики. — М.: Радио и связь, 1985.

9. Мустель Е. Р., Парыгин В. Н. Методы модуляции и сканирования света. — М.: Наука, 1970.

10. Ярив А. Введение в оптическую электронику. — М.: Высшая школа, 1983.

С. В. ЗАВЬЯЛОВ

Украина, Одесский гос. политехнический ун-т

Дата поступления в редакцию  
10.12 1999 г.

Оппоненты д. т. н. В. А. МОКРИЦКИЙ,  
к. ф.-м. н. С. М. РОТНЕР

## НОВЫЕ ПОДЛОЖКИ ДЛЯ АЛМАЗОПОДОБНЫХ ПЛЕНОЧНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ ЭЛЕКТРОНИКИ

*Предлагается технология производства нетрадиционных подложек из анодно-оксидированного алюминия, по изоляционным свойствам значительно превосходящих традиционные подложки из керамики.*

Синтез углеродных алмазоподобных пленок (АПП) осуществляется плазмохимическим методом из жидкого органического реагента с ВЧ-ассистированием [1]. Легирование АПП металлами, такими как Cr, W, Ti, значительно расширяет их свойства. Электропроводные АПП обладают такими важными для создания элементов электроники свойствами, как высокая стабильность проводимости, низкая величина температурного коэффициента сопротивления ( $10^{-6} - 10^{-4}$  1/К), широкий диапазон удельного сопротивления ( $10^{-4} - 10^9$  Ом·см), стойкость к сверхбольшим (более  $10^6$  А/см<sup>2</sup>) плотностям тока, превышающая миграционный предел меди, высокая однородность распределения сопротивления по поверхности подложки, низкий уровень шумов, высокая

износостойкость и микротвердость, радиационная и термостойкость. Это позволяет использовать их для создания пассивной элементной базы электроники с мощностью рассеяния до 150 Вт/см<sup>2</sup> в сочетании с малыми размерами — резисторов, нагревательных элементов и т. д.

Для полной реализации принципиальных возможностей электропроводных АПП требуется решение еще некоторых проблем. Одна из них — замена традиционных подложек из керамики на более совершенные, обладающие высокой теплопроводностью и возможностью изоляции АПП. Однако в одном материале такие свойства не сочетаются.

Лучшим теплопроводящим материалом с точки зрения экономичности и технологичности является алюминий, но он не диэлектрик. Диэлектрическую пленку на поверхности алюминия образует его оксид. Однако такая пленка, формирующаяся естественным образом, не отвечает требованиям, предъявляемым к материалам подложек под АПП.

Оксидный слой на алюминии может быть сформирован путем анодного окисления. Основными