

УДК 535.8

Оптико-электронное устройство для управления оптическим излучением на основе метаматериала с наноразмерным металлическим слоем

А. М. Филачев, В. П. Пономаренко, А. Н. Свиридов, А. С. Кононов,
М. В. Седнев, К. М. Куликов, А. С. Селиванов

Разработана математическая модель плазмонного модулятора лазерного излучения на основе метаматериала с наноразмерным металлическим слоем. Получены исходные данные (число слоев и их толщины, материалы слоев и согласующих призм и др.) для конструирования модуляторов на длины волн 0,63; 1,15; 3,39 и 10,6 мкм. Построен и исследован лабораторный макет модулятора на длину волны 0,63 мкм.

PACS: 42.25.Hz; 42.30.Lz

Ключевые слова: метаматериалы, плазмонный модулятор, оптический затвор, показатель преломления.

Введение

Плазмонные модуляторы оптического излучения относятся к новым перспективным типам устройств для управления оптическим излучением. Из литературных данных известно, что к настоящему времени разработаны образцы плазмонных модуляторов для видимой области спектра ($\lambda = 0,63$ мкм), которые характеризуются низким управляющим напряжением, большой глубиной и высокой частотой модуляции. Большой практический интерес представляют модуляторы, работающие в ИК-области спектра (в частности, на длине волны 10,6 мкм). Для того чтобы разработать подобный модулятор, была создана математическая модель устройства, на основе которой проведены расчеты характеристик пропускания, отражения и поглощения слоистых метаматериалов и определены оптимальные параметры устройств управления оптическим излучением (число и толщины слоев, материалы слоев и согласующих призм и др.). В результате получены исходные данные для конструирования модулятора на длину волны 10,6 мкм. На основе этих данных были определены технические требования к конструкции

устройства для управления оптическим излучением, к наноматериалам, образующим слоистые структуры устройств, к установке для измерения параметров устройств управления оптическим излучением и разработана эскизная конструкторская документация. Показано, что устройство может работать как управляемый оптический ослабитель, как оптический затвор, как оптический модулятор или как оптический элемент, удаляющий из полихроматического пучка лучи с заданной длиной волны.

Оптико-электронные устройства для управления оптическим излучением

На рис. 1 показана принципиальная схема оптико-электронного устройства для управления характеристиками отраженного оптического излучения, содержащего согласующую призму 2 и три, расположенных друг за другом, слоя из различных сред, имеющих разные толщины (d_1, d_3) и диэлектрические проницаемости ($\epsilon_2, \epsilon_1, \epsilon_3, \epsilon_0$). Слой диэлектрика 1 находится между плоскостью согласующей призмы и металлическим слоем 3 (например, слоем золота, толщина которого в зависимости от рабочей длины волны модулятора находится в пределах 30—90 нм), нанесенным на пластину 0.

Изменяя характеристики слоя диэлектрика (например, диэлектрическую проницаемость или толщину d_1), можно управлять оптическими характеристиками устройства, а также интенсивностью и длиной волны выходящего излучения. В качестве диэлектрика может быть использован электрооптический материал, т. е. материал, диэлектрическая проницаемость которого меняется

Филачев Анатолий Михайлович, генеральный директор.
Пономаренко Владимир Павлович, зам. генерального директора.
Свиридов Анатолий Николаевич, главный специалист.
Кононов Андрей Сергеевич, главный метролог.
Седнев Михаил Васильевич, начальник участка.
Куликов Константин Михайлович, ведущий научный сотрудник.
Селиванов Александр Сергеевич, ведущий инженер.
ФГУП «НПО «Орион»».
Россия, 111402, Москва, ул. Косинская, 9.
Тел. (495) 374-94-00. E-mail: orion@orion-ir.ru
Статья поступила в редакцию 20 августа 2009 г.

под действием напряжения, приложенного к металлическим пленкам, или слой воздуха с изменяемой толщиной.

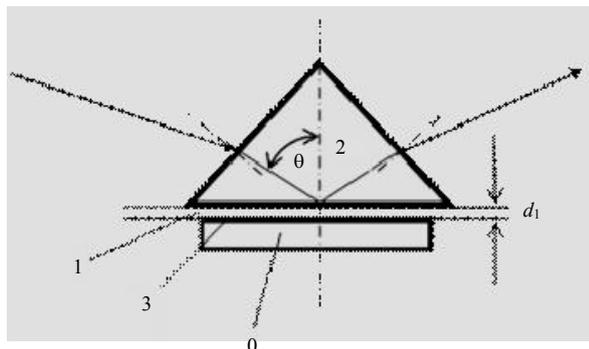


Рис. 1. Принципиальная оптическая схема экспериментального устройства для управления характеристиками оптического излучения

Электромагнитный отклик подобной слоистой структуры может (при определенных условиях: длина волны излучения, угол падения, диэлектрические проницаемости материалов призмы и слоев) радикальным образом отличаться от отклика компонентов, составляющих эту структуру. В частности, возможно реализовывать (вследствие обеспечения условий возбуждения продольного плазмонного резонанса — продольных колебаний электронного газа в нанометровой металлической пленке) управляемое по величине как поглощение, так и отражение падающего электромагнитного излучения.

Подобное устройство может работать как управляемый оптический ослабитель, как оптический затвор, как оптический модулятор или как оптический элемент, удаляющий из полихроматического пучка лучи с заданной длиной волны.

Для построения корректной математической модели, отображающей работу реальных устройств управления оптическим излучением, помимо адекватного математического описания физических явлений, происходящих при взаимодействии падающей поперечной электромагнитной волны со слоистым метаматериалом, содержащим металлические пленки нанометровой толщины, необходимо точное знание величин, характеризующих оптические свойства материалов, из которых состоят призмы, диэлектрические пластины, наноразмерные металлические пленки и др. В нашем случае это в первую очередь относится к таким характеристикам, как показатели преломления (диэлектрические проницаемости) материалов. Показатели преломления наиболее распространенных диэлектрических и полупроводниковых материалов призм и пластин известны с достаточной точностью и приводятся в литературе [1, 2] (табл. 1):

Таблица 1

Материал	Длина волны, мкм	Показатель преломления
Фтористый барий	1,15	1,44
	3,39	1,41
	10,6	1,394
Плавный кварц SiO ₂	0,5	1,462
	0,55	1,460
	0,59	1,458
	0,60	1,458
	0,65	1,457
	0,7	1,455
	0,75	1,454
	0,8	1,453
Кремний	0,85	1,452
	1,4	3,49
	1,50	3,48
	1,66	3,47
	1,82	3,46
	2,05	3,45
	2,50	3,44
	3,50—5,00	3,43
6,00—25,00	3,42	

Параметры металлических пленок нанометровой толщины зависят от реальных условий их получения (аппаратуры, методов и режимов нанесения пленок, чистоты, шероховатости, материала подложки, на которую наносится пленка и др.). Поэтому результаты измерений комплексных показателей преломления пленок, проводимых разными исследователями, могут отличаться одни от других.

Для примера в табл. 2 [14] и 3 приведены данные о величинах показателей преломления n и диэлектрических проницаемостей золотых и серебряных пленок.

Таблица 2

Оптические константы для поликристаллического золота

Длина волны, мкм	Действительная часть показателя преломления n	Мнимая часть показателя преломления k
5635,45	0,306	2,88
6525,26	0,166	3,15
6887,78	0,160	3,8
10 331,7	0,272	7,07
11 270,9	0,312	7,93
12 398,0	0,3372	8,77
32 626,3	1,876	20,2
33 508,1	1,958	20,7
34 438,9	2,046	2,046
91 837,0	91 837,0	51,600
95 369,2	11,51	53,1
99 184,0	12,24	54,700

Таблица 3

Материал пленки	Длина волны, нм	Толщина, нм	Показатель преломления n	Диэлектрическая проницаемость ϵ	Литература
Серебро	632,8	40	$0,085 + 4,22 \cdot i$	$-17,801 + 0,717 \cdot i$	[3]
Серебро	632,8	40	$0,066 + 4,045 \cdot i$	$-16,358 + 0,534 \cdot i$	[4]
Серебро	632,8	—	$0,057 + 4,243 \cdot i$	$-18 + 0,48 \cdot i$	[5]
Золото	632,8	35	$0,183 + 3,57 \cdot i$	$-12,711 + 1,307 \cdot i$	[6]
Золото	632,8	27,1	$0,266 + 3,52 \cdot i$	$-12,32 + 1,187 \cdot i$	[6]
Золото	632,8	—	$0,144 + 3,467 \cdot i$	$-12 + 1 \cdot i$	[7]
Серебро	632,8	—	$0,118 + 4,244 \cdot i$	$-18 + 1 \cdot i$	[7]
Серебро	632,8	—	$0,06656 + 4,045 \cdot i$	$-16,539 + 0,538 \cdot i$	[8]
Золото	9918,0	—	$12,24 + 54,7000 \cdot i$	$(-2,842 + 1,339 \cdot i) \cdot 10^3$	[9]
Золото	4,83	—	$1,83 + 33 \cdot i$	$(-1,086 + 0,128 \cdot i) \cdot 10^3$	[10]
Серебро	4,37	—	$4,34 + 32,6 \cdot i$	$(-1,044 + 0,283 \cdot i) \cdot 10^3$	[10]

Следует отметить, что расчеты ожидаемых характеристик устройств управления оптическим излучением (проведенные ниже в рамках построенной математической модели) показали, что коэффициенты отражения устройств при толщинах пленок, превышающих 40 нм, слабо зависят от толщины, т. е. так же, как и от небольших (до 10 %) вариаций величин показателей преломления металлических пленок. Гораздо хуже дело обстоит с параметрами электрооптических слоев на основе органических соединений (прежде всего это относится к спектральным зависимостям показателей преломления от напряженности приложенного электрического поля). Эти параметры трудно с достаточной точностью получить из литературных источников. Они в значительной мере определяются реальной технологией, используемой при построении конкретного устройства управления электрооптическим излучением. Поэтому на данном этапе исследований была выбрана схема устройства управления оптическим излучением, при-

веденная на рис 1, где управление излучением происходит только за счет изменения воздушного зазора.

Краткое описание математической модели

Рассмотрим базовую четырехкомпонентную структуру, оптическая схема которой приведена на рис. 1. На основе френелевской теории отражения света от слоистой системы с учетом подходов, изложенных в [11—13], была построена математическая модель, описывающая взаимодействие подобной системы с падающей поперечной электромагнитной волной.

Полученное в рамках этой математической модели выражение использовано для расчетов зависимостей коэффициентов отражения оптической структуры (представленной далее на рис. 4) от углов падения излучения θ и толщин слоев d_1 и d_3 , т. е. для расчета характеристик устройств управления оптическим излучением

$$R = \frac{\left[\frac{\epsilon_1 \cdot k_2 - \epsilon_2 \cdot k_1}{\epsilon_1 \cdot k_2 + \epsilon_2 \cdot k_1} + \frac{\epsilon_0 \cdot k_1 - \epsilon_1 \cdot k_0 - li \cdot \left[\epsilon_3 \cdot \left(k_0 \cdot \frac{k_1}{k_3} \right) - \epsilon_0 \cdot \frac{\epsilon_1}{\epsilon_3} \cdot k_3 \right] \cdot \tan(k_3 \cdot d_3)}{\epsilon_0 \cdot k_1 + \epsilon_1 \cdot k_0 - li \cdot \left[\epsilon_3 \cdot \left(k_0 \cdot \frac{k_1}{k_3} \right) + \epsilon_0 \cdot \frac{\epsilon_1}{\epsilon_3} \cdot k_3 \right] \cdot \tan(k_3 \cdot d_3)} \right] \cdot \exp(2 \cdot li \cdot k_1 \cdot d_1)}{1 + \frac{\epsilon_1 \cdot k_2 - \epsilon_2 \cdot k_1}{\epsilon_1 \cdot k_2 + \epsilon_2 \cdot k_1} + \frac{\epsilon_0 \cdot k_1 - \epsilon_1 \cdot k_0 - li \cdot \left[\epsilon_3 \cdot \left(k_0 \cdot \frac{k_1}{k_3} \right) - \epsilon_0 \cdot \frac{\epsilon_1}{\epsilon_3} \cdot k_3 \right] \cdot \tan(k_3 \cdot d_3)}{\epsilon_0 \cdot k_1 + \epsilon_1 \cdot k_0 - li \cdot \left[\epsilon_3 \cdot \left(k_0 \cdot \frac{k_1}{k_3} \right) + \epsilon_0 \cdot \frac{\epsilon_1}{\epsilon_3} \cdot k_3 \right] \cdot \tan(k_3 \cdot d_3)} \right] \cdot \exp(2 \cdot li \cdot k_1 \cdot d_1)},$$

где

$$k = \left(\frac{2 \cdot \pi}{\lambda} \right) \cdot \epsilon_2^{0,5} \cdot \sin(\theta);$$

$$k_0 = \left[\epsilon_0 \left(\frac{2 \cdot \pi}{\lambda} \right)^2 - k^2 \right]^{0,5};$$

$$k_1 = \left[\epsilon_1 \left(\frac{2 \cdot \pi}{\lambda} \right)^2 - k^2 \right]^{0,5};$$

$$k_2 = \left[\epsilon_2 \left(\frac{2 \cdot \pi}{\lambda} \right)^2 - k^2 \right]^{0,5};$$

$$k_3 = \left[\epsilon_3 \left(\frac{2 \cdot \pi}{\lambda} \right)^2 - k^2 \right]^{0,5}.$$

Расчеты проводили для четырех устройств, реализующих приведенную на рис. 1 оптическую структуру (табл. 4).

Таблица 4

Номер устройства	Длина волны падающего излучения λ , нм	Согласующая призма		Слой		Подложка, на которую напылен слой золота
		материал	показатель преломления n_2	воздушный (вакуумный); показатель преломления n_1	золото; показатель преломления n_3	показатель преломления n_0
1	632,8	SiO ₂	1,457	1	0,183+1i·3,57	Кварц, 1,457
2	1150	"	1,44	1	0,312+1i·7,93	Кварц, 1,44
3	3390	"	1,41	1	1,958+1i·20,7	Кварц, 1,41
4	10 600	Фтористый барий	1,394	1	12,24+1i·54,7	Фтористый барий, 1,394

Результаты расчетов

Результаты расчетов основных данных для проектирования устройства для управления оптическим излучением представлены на рис. 2 (устройство 1) и рис. 3 (устройство 4) в виде зависимостей коэффициента отражения слоистой структуры устройства от угла падения луча θ на согласующую призму устройства, d_1 — толщины диэлектрического (воздушного) слоя между золотой пленкой ОЭЭ и большой гранью согласующей призмы, d_3 — толщины золотой пленки ОЭЭ.

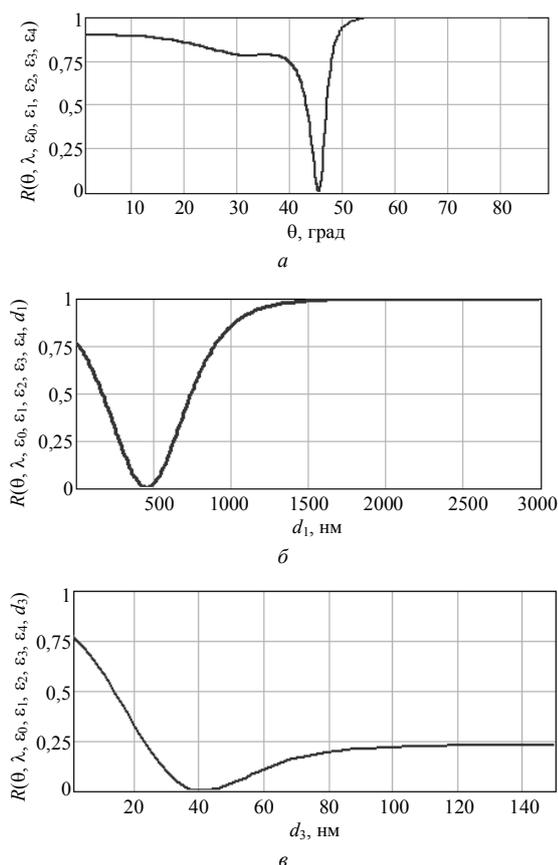


Рис. 2. Зависимости коэффициента отражения устройства 1 от:

a — θ —угла падения излучения с длиной волны 632,8 нм (при толщине воздушного зазора $d_1 = 453$ нм и толщине золотой пленки $d_3 = 40$ нм); *б* — d_1 —толщины воздушного зазора (при угле падения излучения $\theta = 45,504^\circ$ с длиной волны 632,8 нм и толщине золотой пленки $d_3 = 40$ нм); *в* — d_3 —толщины золотой пленки (при угле падения излучения $\theta = 45,504^\circ$ с длиной волны 632,8 нм и толщине воздушного зазора $d_1 = 453$ нм)

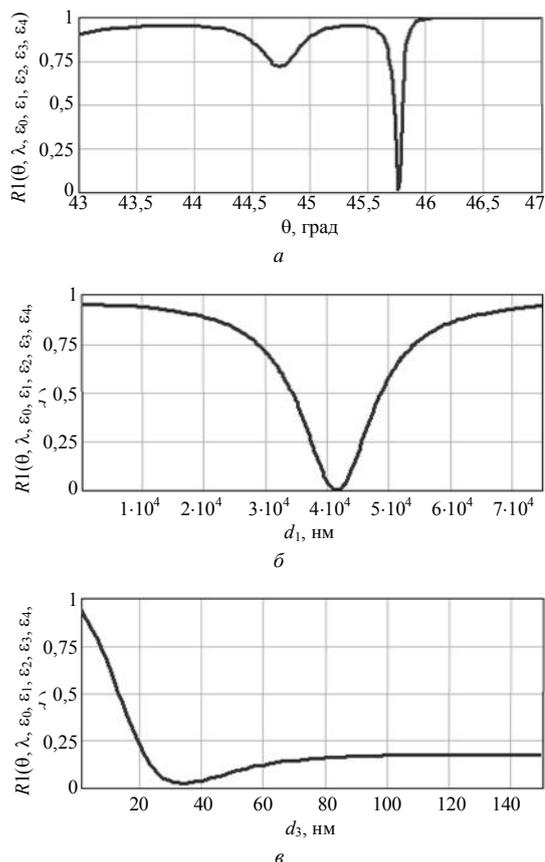


Рис. 3. Зависимости коэффициента отражения устройства 4 от:

a — θ —угла падения излучения с длиной волны 10,6 мкм (при толщине воздушного зазора $d_1 = 40000$ нм и толщине золотой пленки $d_3 = 40$ нм); *б* — d_1 —толщины воздушного зазора (при угле падения излучения $\theta = 45,767^\circ$ с длиной волны 10,6 мкм и толщине золотой пленки $d_3 = 40$ нм); *в* — d_3 —толщины золотой пленки (при угле падения излучения $\theta = 45,767^\circ$ с длиной волны 10,6 мкм и толщине воздушного зазора $d_1 = 40000$ нм)

Изменение коэффициента отражения от толщины воздушного зазора показывает предельно достижимую глубину модуляции устройства. Зависимость коэффициента отражения: от θ позволяет выбрать угол падения луча на согласующую призму, обеспечивающий максимальную глубину модуляции, а от d_3 — выбрать толщину золотого слоя ОЭЭ, при которой достигается максимальная глубина модуляции. Это устройство может быть реализовано при обеспечении точности угловой юстировки луча не хуже чем 1 град (см. рис. 2 и 3).

Из рассчитанных зависимостей следует, что практическая реализация устройства 4 представляется существенно более трудной, чем реализация устройства 1, поэтому для экспериментальных исследований был выбран вариант, реализующий устройство 1.

Результаты исследования

Экспериментальное исследование устройства 1 для управления оптическим излучением проводилось на измерительном стенде, схема которого показана на рис. 4.

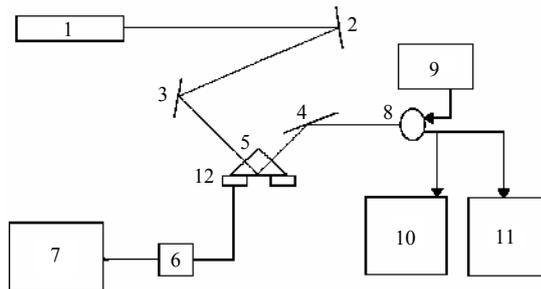


Рис. 4. Схема измерительного стенда:

1 — лазер; 2—4 — поворотные (юстировочные) зеркала; 5 — прямоугольная согласующая призма; 6 — трансформатор; 7 — генератор синусоидальных сигналов; 8 — ФПУ с фотодиодом ФД-7А; 9 — источник питания постоянного тока Б5-43; 10 — осциллограф С1-55; 11 — микровольтметр В6-9; 12 — актюатор ПП-4

На рис. 5 показана фотография лабораторного макета устройства 1 на измерительном стенде.

Наибольшая глубина модуляции $m \approx 13,3\%$ была получена при наличии напряжения постоянного смещения на ПП-4. Достигнутая величина глубины модуляции дает основания полагать, что на практике не удалось с необходимой точностью воспроизвести исходные условия, при которых выполнялись расчеты. В первую очередь это связано с точностью угловой юстировки луча (о которой говорилось выше). Ошибка в угле падения луча всего на 1 град снижает предельно достижимую глубину модуляции на 25%. Кроме того, степень поляризации лазерного луча оказалась существенно меньшей 100%. В математической модели предполагалось, что источник имеет 100%-ную поляризацию в плоскости падения луча. Следует также принять во внимание разброс толщин золотых слоев, который мог достигать нескольких нанометров.

Следует отметить, что при расчетах были использованы усредненные значения комплексной диэлектрической проницаемости золотого слоя толщиной ≈ 40 нм. Реальные слои имеют разброс как по толщине, так и по диэлектрической проницаемости. Приведенные выше соображения объяс-

няют количественные расхождения между теоретическими и экспериментальными результатами.

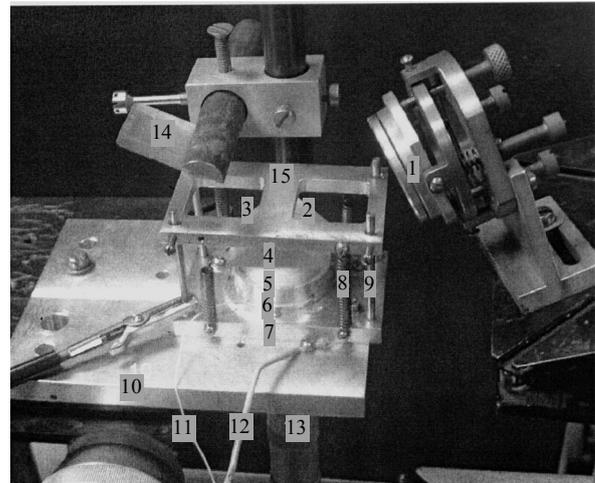


Рис. 5. Лабораторный макет устройства 1:

1 — зеркало, направляющее излучение на входную грань 2 согласующей призмы; 2 — входная грань согласующей призмы; 3 — выходная грань согласующей призмы; 4 — согласующая призма; 5 — опора — диэлектрический цилиндр, на котором расположена согласующая призма; 6 — каркас, металлический цилиндр, в котором движется опора; 7 — основание; 8 — пружины, прижимающие пластину 15 к согласующей призме; 9 — стержни (направляющие, по которым движется прижимная пластина); 10 — пластина, на которой расположено устройство, закрепленная на юстировочном столе; 11 и 12 — провода, по которым подается управляющее напряжение на пьезокорректор (актюатор ПП-4); 13 — микрометрический винт, с помощью которого устанавливается начальная толщина d_3 воздушного зазора между большей гранью призмы и нанометровым золотым слоем ОЭЭ; 14 — зеркало, направляющее излучение, выходящее через грань 3 на фотоприемное устройство; 15 — прижимная пластина

Заключение

Построение макета экспериментального устройства для управления оптическим излучением и его испытания позволили уточнить параметры металлических пленок и приступить к устройствам с электрооптическими слоями.

Зная реальные (получаемые с помощью нашей технологии) параметры металлических пленок, можно в дальнейшем измерить и параметры электрооптических слоев с помощью лабораторной измерительной установки, принципиальная оптическая схема которой показана на рис. 4.

Экспериментально подтверждена возможность управления оптическим излучением, т. е. возможность модуляции, управляемого ослабления, удаления излучения с заданной длиной волны (из полихроматического луча) за счет изменения толщины диэлектрического слоя в слоистой структуре, образованной большой гранью согласующей призмы, слоем воздуха, металлическим

слоем толщиной ≈ 40 нм, нанесенным на диэлектрическую подложку. Следовательно, подтверждена правильность исходной математической модели устройства, с помощью которой проводились расчеты устройств 1—4.

Л и т е р а т у р а

1. Воронкова Е. М., Гречушников Б. Н., Дистлер Г. И., Петров И. П. Оптические материалы для инфракрасной техники. — М.: Наука, 1965.
2. <mailto:sales@elektrosteklo.ru>. Materials_rus\materials_rus.htm. Materials_rus\ZnSe_rus.htm. Materials_rus\Si_rus.htm.
3. Jay S. Schildkraut Long-range surface plasmon electrooptic modulator// Applied optics. 1988. V. 27. No. 21/1. November. P. 4587—4590.
4. Jiang Yi, Zhuangqi Cao, Guang Chen, Xiaoming Dou, Yingli Chen. Low voltage electro-optic polymer light modulator using attenuated total internal reflection// Optics & Laser Technology. 2001. No. 33. P. 417—420. www.elsevier.com/locate/optlastec.
5. Jos van Gent, Paul V. Lambeck, Harrie J. M. Kruwel, Gerrit J. Gerritsma, Ernst J. R. Sudholter, David N. Reinhoudt, Theo J. A. Popma. Optimization of a chemo-optical surface plasmon resonance based sensor// Applied optics. 1990. V. 29. No. 19/1. July. P. 2843—2849.
6. Chyou J.-J., Chu C.-S., Shih Z.-H., Lin C.-Y., Huang K. T., Chen S. J., Shu S. F. High efficiency electro-optic polymer light modulator based on waveguide — coupled surface plasmon resonance// Taiwan Ministry of Education under grant number A-91-E-FA08-1-4.
7. Phelps J. M., Taylor D. M. Determining the relative permittivity and thickness of a lossless dielectric overlayer on a metal film using optically excited surface plasmon polaritons// J. Phys. D: Appl. Phys. 1996. No. 29. P. 1080—1087.
8. Jung C., Yee S., Kuhn K. Electro-optic polymer light modulator based on surface plasmon resonance// Applied optics. @ 1995. V. 34. No. 6. @ 20 February. P. 946—949.
9. Jung C., Yee S., Kuhn K. 'Handbook of Optical Constants of Solids', Ed. by Edward D. Palik// Academic Press, Inc., 1985.
10. Max Garbuny. Optical Physics// Ibid, 1965.
11. Abeles F. Sur la Propagation des Ondes Electromagnetiques dans les Milieux Stratifies// Ann. phys. 1948. No. 3. P. 504—520.
12. Abeles F. Recherches sur la Propagation des Ondes Electromagnetiques dans les Milieux Stratifies. Application aux Couches Minces// Ibid. 1950. No. 5. P. 596—640.
13. Kretschmann E. Die Bestimmung optischer Konstanten von Metallen durch Anregung von Oberflächplasmaschwingungen// Z. Physik. 1971. No. 241. P. 313—324.
14. Ed. by Edward D. Palik. Optical constants for polycrystalline Au/ Handbook of Optical of Solids // Academic Press, Inc., 1985.

The optoelectronic device for control of optical radiation on the basis metamaterials with nanodimensional with a metal layer

A. M. Filachev, V. P. Ponomarenko, A. N. Sviridov, A. S. Kononov, M. V. Sednev,
K. M. Kulikov, A. S. Selivanov

Orion Research-and-Production Association, 9 Kosinskaya str., Moscow, 111402, Russia
E-mail: orion@orion.-ir.ru

The mathematical model plasmon of the modulator of a laser radiation on the basis metamaterials with nanodimensional by a metallic layer is designed. The input dates (number of layers and depth of layers, stuffs of layers and matching prisms etc.) for designing of modulators on wavelength 0.63; 1.15; 3.39 and 10.6 microns are obtained. Is constructed and the laboratory breadboard of the modulator on a wavelength 0.63 microns is investigated.

PACS: 42.25.Hz; 42.30.Lz

Keywords: metamaterials, plasmon modulator, optical lock, refraction index.

Bibliography — 14 references.

Received 20 August 2009