

УДК 535.241.13 : 534

Н. Б. Кулешов, И. В. Токарев

(Киев, Украина)

### ОПТИМИЗАЦИЯ МАТРИЧНОГО УПРАВЛЕНИЯ ПРОСТРАНСТВЕННЫМИ МОДУЛЯТОРАМИ СВЕТА НА ОСНОВЕ ВЯЗКОУПРУГИХ ДЕФОРМИРУЕМЫХ СРЕД. Ч. II

Основным элементом систем оптической обработки информации и проекционных устройств отображения информации является пространственный модулятор света (ПМС). В ч. I настоящей работы описывается численно-аналитическая методика расчета распределения электрических полей в матричных ПМС. Эта методика применяется для анализа ПМС на основе вязкоупругих деформируемых сред, для которых рассчитываются распределения деформирующих сил и рельефа. Анализируются конструкции ПМС с непосредственным управлением через вязкоупругий слой. В ч. II настоящей работы исследуются ПМС с управлением через воздушный промежуток. Проанализировано шесть известных конструкций ПМС, для которых получены оптимальные соотношения между шириной проводящего участка электродного раstra и периодом его повторения, а также между периодом повторения и толщиной вязкоупругого деформируемого слоя.

3.1.2. Определенный интерес представляет управление ВУС без проводящего покрытия с помощью пассивной матрицы, т. е. с напряжением на смежных полосках ЭР противоположной полярности ( $\pm V_0$ ) (рис. 7), поскольку изучению формирования рельефа в таком ПМС посвящено несколько экспериментальных исследований [8, 10], данные которых интересно сопоставить с нашими результатами. Для реализации такого ПМС в обобщенной структуре на рис. 1 (ч. I) следует положить  $h \rightarrow \infty$ ,  $\Delta V/V_0 = -2$ ,  $\epsilon_3 = 1$ . Конфигурация электрического поля в этом ПМС приводит к исчезновению постоянной составляющей поля  $E_{x0} = V_0 B^{(2)}/d = 0$ , а деформация ВУС обусловлена переменными компонентами продольной  $E_{x1}$  и поперечной  $E_{z1}$  составляющих электрического поля. При этом в гармонических разложениях этих составляющих отсутствуют гармоники, кратные периоду ЭР (см. (32) (ч. I)  $x_0 = 0$ , а следовательно,  $x_i = 0$ ). Это, в свою очередь, приводит к тому, что в выражении для деформирующего натяжения (35), которое квадратично по полю, суммируются только четные, т. е. кратные периоду ЭР, гармоники. Это наглядно видно на рис. 8, где показаны зависимости  $R_2^{(n)}$  от  $a/l$ , а также на

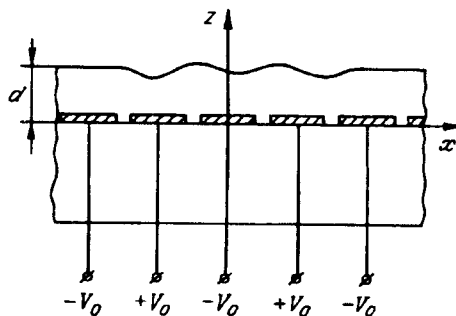


рис. 9, где приведены зависимости гармоник деформирующего натяжения и рельефа частоты ЭР. Данные, представленные на этих рисунках, подтверждают экспериментальные результаты [8], что при  $0 < a/l < 0,5$  и  $kd < 0,15$  происходит удвоение пространствен-

Рис. 7. Схематическое представление ПМС на основе вязкоупругого слоя, управление которым осуществляет пассивная матрица непосредственно через ВУС

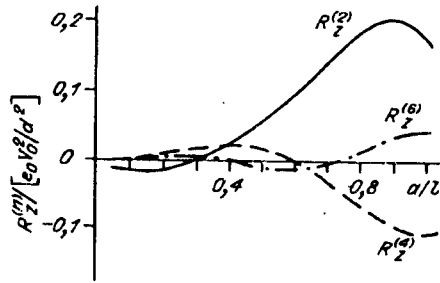


Рис. 8. Зависимость первых трех гармоник деформирующего натяжения от относительной ширины полосок управляющего ЭР для разных соотношений между сигналом и напряжением смещения.

Значения параметров:  $\Delta V/V_0 = -2$ ;  $h \rightarrow \infty$ ;  $kd = 0,55$ ;  $\epsilon_1 = 6$ ;  $\epsilon_2 = 2,6$ ;  $\epsilon_3 = 1$

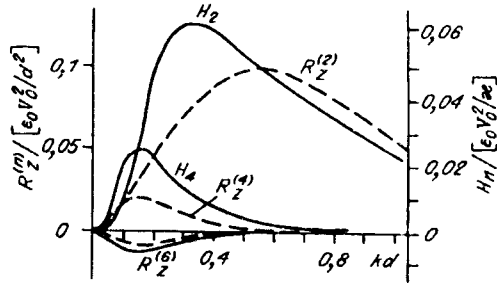


Рис. 9. Зависимость первых трех гармоник деформирующего натяжения (штриховые кривые) и геометрического рельефа (сплошные) от пространственной частоты ЭР  $kd$  для ПМС, представленного на рис. 7.

Расчетные параметры:  $\Delta V/V_0 = -2$ ;  $a/l = 0,9$ ;  $h = \infty$ ;  $\epsilon_1 = 6$ ;  $\epsilon_2 = 2,6$ ;  $\epsilon_3 = 1$ ;  $2Gd/\kappa = 0,01$

ной частоты геометрического рельефа, а при  $0,3 < a/l < 0,6$  и  $kd \geq 0,5$  — форма геометрического рельефа близка к синусоидальной, так как  $R_z^{(2)}$  существенно превышает другие гармоники.

В работе [10] исследовалась дифракция света на геометрическом рельефе в зависимости от прикладываемого к ЭР напряжения по показателю светорассеяния:

$$\Delta = [I_0(0) - I_0(V)] / I_0(0), \quad (45)$$

где  $I_0(V)$  — интенсивность света в нулевом дифракционном порядке при приложении к электродам напряжения  $V$ . Для эксперимента применялось силиконовое масло ( $\kappa = 0,0201$  Н/м;  $\epsilon_2 = 2,6$ ) толщиной  $d = 3-4$  мкм на стеклянной подложке ( $\epsilon_1 = 6$ ) с электродным растром ( $a/l = 0,5$ ;  $l = 10$ ;  $20$ ;  $40$ ;  $100$  и  $200$  мкм). Для этих параметров был рассчитан показатель светорассеяния по формуле

$$\Delta = 1 - \frac{1}{l} \int_0^l \left| \exp \left( j \frac{2\pi}{\lambda} (n-1) \frac{\epsilon_0 \epsilon_2 V_0^2}{\kappa} f(x) \right) \right|^2 dx, \quad (46)$$

где  $n$  — показатель преломления ВУС,  $\lambda$  — длина волны считывающего света, а  $f(x)$  — безразмерная функция, описывающая форму геометрического рельефа. На рис. 10 представлены расчетные кривые вместе с экспериментальными данными, взятыми из статьи [10], между которыми, как видно, существует неплохое соответствие.

Отметим, что для получения максимальных значений деформирующего натяжения, а следовательно и геометрического рельефа, следует выбирать ЭР с относи-

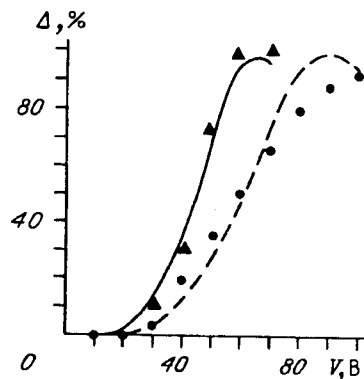


Рис. 10. Сравнение полученных теоретически зависимостей показателя светорассеяния  $\Delta$  от прикладываемого напряжения  $V$  с известными экспериментальными результатами [10] для ПМС, представленного на рис. 7.

Сплошная кривая и точки соответствуют  $l = 100$  мкм; штриховая и треугольники —  $l = 20$  мкм

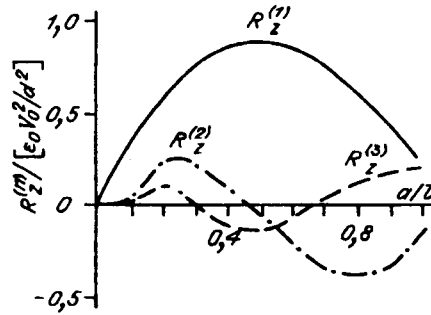


Рис. 11. Зависимость первых трех гармоник деформирующего натяжения от относительной ширины полосок управляющего ЭР для ПМС, представленного на рис. 7, но с проводящей поверхностью ВУС.

Значения параметров:  $h = 0$ ;  $\Delta V/V_0 = -2$ ;  $kd = 0,55$ ;  $\epsilon_1 = 6$ ;  
 $\epsilon_2 = 2,6$

тельной шириной полосок  $a/l \approx 0,9$ , а не  $a/l = 0,5$ , используемое в [10].

3.1.3. Интересен тот факт, что возможно существенное увеличение деформирующего натяжения в том случае, если свободная поверхность ВУС будет иметь высокую проводимость (на рис. 1 (ч. I)  $h = 0$ ,  $\Delta V/V_0 = -2$ ). Это наглядно видно на рис. 11 и связано с тем, что во взаимодействии теперь, наряду с поляризационными зарядами, принимают участие еще и свободные заряды, которые могут перераспределяться под действием поля вдоль проводящей поверхности ВУС, усиливая деформирующее натяжение.

Из приведенных на рис. 5 (ч. I) и 9 частотных характеристик видно, что все они имеют полосовую форму передачи по рельефу, что обусловлено следующими физическими процессами. Вследствие несжимаемости ВУС образование углубления на его поверхности сопровождается одновременным возникновением выступов в соседних участках. Такая деформация поверхности вызывает противодействие внутренней сдвиговой силы, и очевидно, что при заданной величине деформации потребуется большая деформирующая сила на низких пространственных частотах, чем на высоких. Однако высокочастотная деформация вызывает большее растяжение свободной поверхности ВУС, создавая тем самым большую величину противодействующего поверхностного натяжения. Кроме того, слоистая геометрия всех исследуемых конструкций ПМС приводит к экспоненциальному спаду передаточной функции по электрическому полю на высоких пространственных частотах. Совместное действие этих конкурирующих факторов приводит к соответствующему отклику деформации с максимумом на определенной пространственной частоте, которую называют резонансной. Для большинства применений ПММС желательно сдвинуть резонансную частоту в высокочастотную область. В работе [4] получено соотношение для резонансной частоты для ВУС с реологией Фойгта:

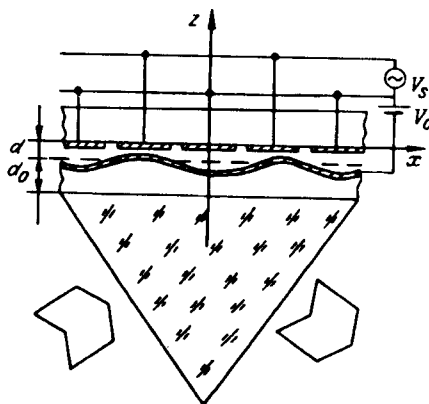
$$k_0 \approx \left( \frac{3G}{\kappa d^3} \right)^{1/4}, \quad (47)$$

которая зависит в основном от параметров среды. Поскольку  $G$  и  $\kappa$  имеют небольшой диапазон изменения, то их влияние на  $k_0$  незначительно, и, по существу, наиболее эффективный путь увеличения  $k_0$  лежит через уменьшение толщины ВУС. Однако очень тонкие однородные слои трудно получить, и, кроме того, развитие деформации в тонких слоях ( $\leq 2$  мкм [4]) происходит неустойчиво. Эти соображения привели к разработке ПМС с иной геометрией управления.

### 3.2. Модуляторы света с адресацией ВУС через воздушный промежуток.

3.2.1. На рис. 12 представлен чертеж ПМС, описанный в [4], в котором электрическое управление осуществляется через воздушный промежуток между электродным растром и ВУС. Модуляция считывающей световой волны происходит за счет комбинации двух эффектов: дифракции и полного внутреннего отражения. Для расчета деформирующего натяжения в таком ПМС в обобщенной структуре на рис. 1 (ч. I) следует положить  $h = 0$ ,  $\epsilon_2 = 1$ ,  $\Delta V/V_0 = 0,1$ , а  $d$  в данном случае обозначает толщину воздушного промежутка между ВУС и ЭР, поэтому толщину ВУС обозначим здесь  $d_0$ . Для этой конструкции, как и для ПМС, представленного на рис. 3 (ч. I), информация пере-

Рис. 12. Схематическое представление ПМС на основе вязкоупругого слоя, управление которым осуществляет активная матрица через воздушный промежуток



дается нечетными гармониками рельефа, а четные гармоники являются паразитными. Зависимость этих гармоник от относительной ширины полосок ЭР качественно не отличается от поведения гармоник на рис. 4 и требует выбора ширины полосок ЭР как можно ближе к периоду ЭР, насколько это возможно, чтобы избежать пробоя между соседними полосками. На рис. 13 представлены зависимости гармонических составляющих рельефа от пространственной частоты ЭР для разных соотношений толщины ВУС и воздушного промежутка ( $d_0/d$ ). Уменьшение толщины воздушного промежутка  $d$  ослабляет экспоненциальный спад пространственно-частотной характеристики, за счет чего происходят расширение полосы передаваемых частот и увеличение резонансной частоты. Тонкие воздушные промежутки также позволяют использовать достаточно высокие управляющие поля без пробоя, поскольку кривая Пашена [4] для воздушных промежутков менее 10 мкм поднимается вверх. Из рис. 13 также видно, что чем меньше толщина воздушного промежутка, тем больше значение  $kd_0$  следует выбирать, чтобы несущая информацию первая гармоника рельефа превышала паразитную вторую гармонику (так, при  $d_0/d = 4$   $kd_0 > 0,5$ , а для  $d_0/d = 1$   $kd_0 > 0,3$ ).

3.2.2. Другой известной разновидностью ПМС [16] с управлением через воздушный промежуток является конструкция, в которой отражающее проводящее покрытие на свободной поверхности ВУС заменяется прозрачным электродом, располагающимся между призмой (или подложкой) и ВУС (рис. 14). Основное преимущество такого расположения заключается в более легкой деформируемости вязкоупругого слоя, так как отсутствие проводящего покрытия означает уменьшение поверхностного натяжения. Однако здесь требуются более высокие управляющие поля из-за того, что приложенное напряжение распределяется между двумя

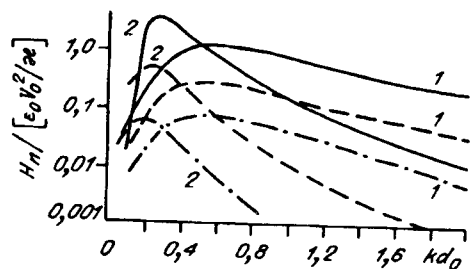


Рис. 13. Зависимость первой и второй гармоник геометрического рельефа от пространственной частоты ЭР  $kd$  для ПМС, представленного на рис. 12.

Сплошные кривые —  $d/d_0 = 4$ ; штриховые —  $d/d_0 = 2$ ; штрихпунктирные —  $d/d_0 = 1$ . Расчетные параметры:  $\Delta V/V_0 = 0,1$ ;  $a/l = 0,9$ ;  $h = 0$ ;  $\epsilon_1 = 3$ ;  $\epsilon_2 = 1$ ;  $2Gd_0/\pi = 0,05$

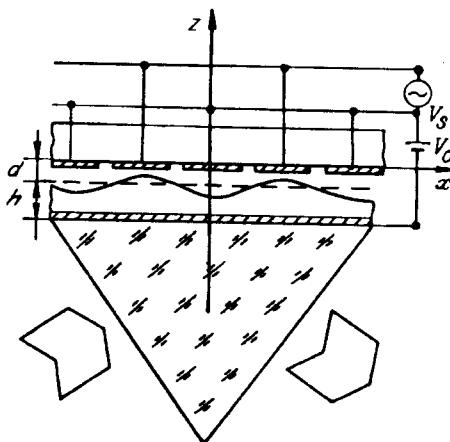


Рис. 14. Схематическое представление ПМС на основе вязкоупругого слоя, управление которым осуществляет активная матрица через воздушный промежуток

диэлектрическими слоями. Для описания такой конструкции ПМС с помощью разработанной нами модели в обобщенной структуре на рис. 1 (ч. I) следует считать:  $d$  — толщина воздушного промежутка;  $\epsilon_2 = 1$ ;  $h$  — толщина ВУС, а  $\epsilon_3$  — диэлектрическая проницаемость ВУС,  $\Delta V/V_0 = 0,1$ .

На рис. 15 показаны зависимости первой (информационной) и второй (паразитной) гармоник деформирующего натяжения от относительной ширины полосок ЭР для разных соотношений между толщиной ВУС и воздушного промежутка. Видно, что при фиксированной пространственной частоте ЭР с уменьшением толщины воздушного промежутка значение  $a/l$  должно все более приближаться к единице, чтобы реализовать превышение  $R_2^{(1)}$  над  $R_2^{(2)}$  (при  $h/d = 1$   $a/l \geq 0,8$ , при  $h/d = 4$   $a/l \geq 0,9$ ). Если же паразитный сигнал второй гармоники отфильтровывать оптическими методами, то оптимальным значением ширины полосок, как видно из рис. 15, является  $a/l = 0,7-0,8$ . На рис. 16 представлены зависимости первой и второй гармоник геометрического рельефа от пространственной частоты ЭР. Отличие от предыдущего случая (см. рис. 13) заключается в увеличении вторых гармоник при уменьшении толщины воздушного промежутка относительно толщины ВУС, что объясняется уже упоминавшимся различием в подключении напряжения смещения  $V_0$ . Здесь также наблюдается увеличение полосы передаваемых частот с ростом  $h/d$  (при  $h/d = 4$  полоса шире в 1,2 раза по сравнению с  $h/d = 1$ ).

Сравнивая максимальные значения первых гармоник на рис. 13 и 16 и полагая все геометрические размеры этих двух типов ПМС одинаковыми, нетрудно оценить соотношение между напряжениями смещения  $V_0$  и постоянными поверхностного натяжения  $\kappa$ , при котором оба ПМС будут иметь одинаковую чувствительность, т. е. если толщина воздушного промежутка в 4 раза меньше толщины ВУС (сплошные линии), то

$$1,1 \frac{V_0^{(1)2}}{\kappa} \approx 0,32 \frac{V_0^{(2)2}}{\kappa}.$$

Учитывая, что для приведенных на рис. 13 и 16 кривых было выбрано  $\kappa_1/\kappa_2 = 4$ , тогда  $V_0^{(1)}/V_0^{(2)} \approx 1,08$ , т. е. напряжения смещения приблизительно равны, а это значит, что для выбранных значений параметров чувствительность этих конструкций ПМС приблизительно одинакова.

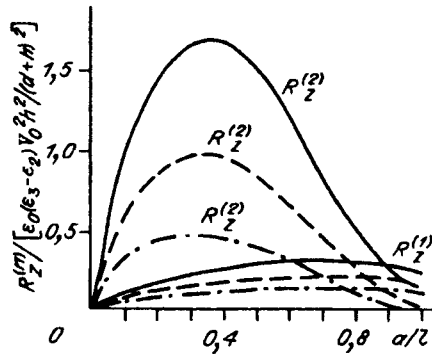


Рис. 15. Зависимость первой и второй гармоник деформирующего натяжения от относительной ширины полосок управляющего ЭР для ПМС, представленного на рис. 14.

Сплошные кривые —  $h/d = 4$ ; штриховые —  $h/d = 2$ ; штрихпунктирные —  $h/d = 1$ . Значения параметров:  $\Delta V/V_0 = 0,1$ ;  $kh = 0,4$ ;  $\epsilon_1 = 3$ ;  $\epsilon_2 = 1$ ;  $\epsilon_3 = 3,5$

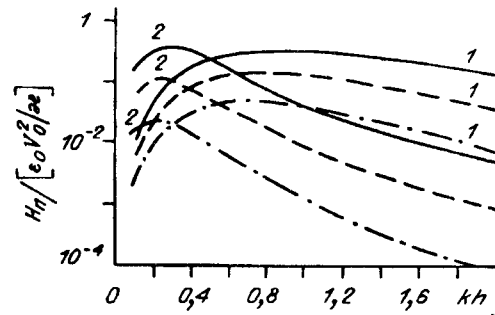
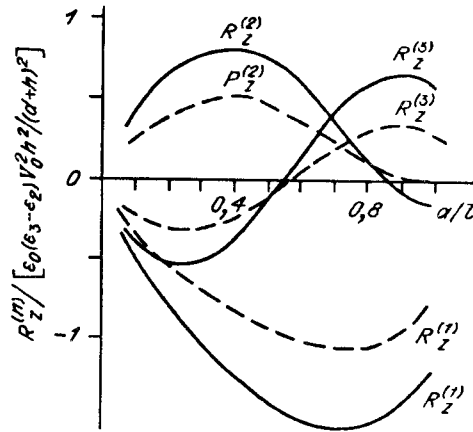


Рис. 16. Зависимость первой и второй гармоник геометрического рельефа от пространственной частоты ЭР  $kh$  для ПМС, представленного на рис. 14. Сплошные кривые —  $h/d = 4$ ; штриховые —  $h/d = 2$ ; штрихпунктирные —  $h/d = 1$ . Расчетные параметры:  $\Delta V/V_0 = 0,1$ ;  $a/l = 0,9$ ;  $\epsilon_1 = 3$ ;  $\epsilon_2 = 1$ ;  $\epsilon_3 = 3,5$ ;  $2Gh/\kappa = 0,2$

Рис. 17. Зависимость первых трех гармоник деформирующего натяжения от относительной ширины полосок управляющего ЭР для ПМС с контрэлектродами.

Сплошные кривые —  $h/d = 4$ ; штриховые —  $h/d = 2$ .  
Значения параметров:  $\Delta V/V_0 = -1$ ;  $kh = 0,4$ ;  $\epsilon_1 = 3$ ;  
 $\epsilon_2 = 1$ ;  $\epsilon_3 = 3,5$



3.2.3. В обоих описанных выше конструкциях ПМС с управлением через воздушный промежуток в формируемом рельефе поверхности неизбежно присутствуют паразитные четные гармоники, что обусловлено включением постоянного напряжения смещения  $V_0$ . Очевидно, что попытка избавиться от этих паразитных гармоник даже за счет существенного снижения чувствительности объясняет применение иных способов включения управляющего напряжения. Так, например, широко используется конструкция [9], в которой электроды для подвода управляющего сигнала, чередуются с контрэлектродами, подсоединяемыми напрямую к прозрачному электроду между призмой и ВУС и находящимися под нулевым потенциалом (см. рис. 14 только без источника постоянного напряжения  $V_0$ ). Для реализации этого случая достаточно положить  $\Delta V/V_0 = -1$ . В этом случае в отсутствие сигнала  $V_s = V_0$  поверхность ВУС не деформируется, а при включении сигнала все гармоники деформирующего натяжения и рельефа передают информацию о сигнале. На рис. 17 представлены зависимости первых трех гармоник деформирующего натяжения от относительной ширины полосок ЭР для разных соотношений толщин деформируемого слоя и воздушного промежутка  $d$ . В силу знакопеременного характера поведения второй и третьей гармоник на основании рис. 17 трудно определить оптимальное значение  $a/l$ . С этой целью на рис. 18 построена зависимость показателя светорассеяния  $\Delta$  от  $a/l$ , где учитывается суммарный вклад рассчитанных гармоник и из которой видно, что оптимальным значением ширины полосок ЭР для данного типа модулятора является  $a = 0,7-0,8l$ . Для значения  $a/l = 0,8$  на рис. 19 построены зависимости гармоник геометрического рельефа от пространственной частоты ЭР, позволяющие получить оптимальное соотношение между толщиной ВУС и периодом ЭР.

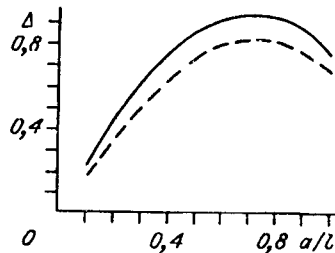


Рис. 18. Зависимость показателя светорассеяния  $\Delta$  от относительной ширины полосок ЭР.

Сплошная кривая —  $h/d = 4$ ; штриховая —  $h/d = 2$

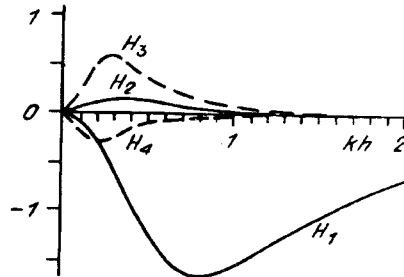


Рис. 19. Зависимость первых четырех гармоник геометрического рельефа от пространственной частоты ЭР  $kh$  для ПМС с контрэлектродами.

Расчетные параметры:  $\Delta V/V_0 = -1$ ;  $h/d = 4$ ;  $a/l = 0,8$ ;  $\epsilon_1 = 3$ ;  
 $\epsilon_2 = 1$ ;  $\epsilon_3 = 3,5$ ;  $2Gh/\kappa = 0,2$

Конструкция ПМС	Соотношение между шириной полосок ЭР и его периодом	Соотношение между периодом ЭР и толщиной ВУС
3.3.1.1	$a \approx 0,95l$	$l \approx 6,5d$
3.3.1.2	$a \approx 0,9l$	$l \approx 9,8d$
3.3.1.3	$a \approx 0,5l$	$l \approx 7,2d$
3.3.2.1	$a \approx 0,95l$	$l \approx 5,2d_0$
3.3.2.2	$a \approx 0,95l$	$l \approx 4h$
3.3.2.3	$a \approx 0,75l$	$l \approx 4h$

**Заключение.** В связи с развитием технологии сверхбольших интегральных схем все более широкое применение получают ПМС с управлением на основе активной матрицы. Для таких ПМС разработана эффективная численно-аналитическая методика расчета электрических полей, позволяющая анализировать и оптимизировать структуру ПМС с любыми светомодулирующими средами.

Данная методика применена для расчета деформирующих натяжений и геометрического рельефа

ПМС на основе вязкоупругих деформируемых сред. Проведен анализ ряда известных конструкций ПМС, которые разбиты на две группы: с непосредственным управлением и с управлением через воздушный промежуток. Показано, что ПМС с непосредственным управлением обладают компактной конструкцией и могут быть выполнены в виде единого светоклапанного «кристалла», тогда как ПМС второй группы позволяют сдвигать «резонансную» частоту в высокочастотную область, расширяя тем самым полосу передаваемых частот. Сравнение теоретических результатов с известными из литературы экспериментальными данными показало хорошее качественное и количественное соответствие. Для шести проанализированных конструкций ПМС получены оптимальные соотношения между шириной полоски управляющего электродного раstra и его периодом, а также между этим периодом и толщиной вязкоупругого деформируемого слоя. Эти результаты сведены в таблицу.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Onozawa T. Influences on director alignment of the lateral bus-line field in an active-matrix-addressed liquid crystal display // Jap. J. Appl. Phys.—1990.—29, N 10.—P. L1853.
2. Glenn W. E. Solid-state-driven deformable television light modulator // SID'87 Digest.—1987.—P. 72.
3. Гушо Ю. П. Оптические характеристики модулятора света «Рельеф» // ЖНиПФик.—1988.—33, № 6.
4. Tepe R., Gerhard-Multhaupt R., Brinker W. Viscoelastic control layers for solid state light valves // Proc. Soc. Photo-Opt. Instrum. Eng.—1986.—684.—P. 20.
5. Tepe R. Theoretical analysis of an electrically addressed viscoelastic spatial light modulator // JOSA. A.—1987.—4, N 7.—P. 1273.
6. Tepe R. Steuerbare Lichtmodulatoren für optische Informationsverarbeitung am Beispiel viskoelastischer Schichten: Theorie und Anwendung // NTZ-Archiv.—1988.—10, N 10.—S. 269.—T. 1; N 11.—S. 295.—T. 2.
7. Алексин В. А., Гушо Ю. П. Оптические характеристики систем фазовой рельефографии с регистрацией сигналов со стороны подложки // Оптика и спектроскопия.—1982.—52, № 1.
8. Азовцев В. П., Голосной О. В., Евтихий Н. И. и др. О влиянии геометрических параметров структуры «ребенчатые электроды — деформируемый эластомер» на электрические пондеромоторные силы // Техника средств связи. Сер. Техника телевидения.—1980.—Вып. 3(23).
9. Алексин В. А. Расчет характеристик многоканальных фазовых рельефографических модуляторов света // Автометрия.—1990.—№ 1.
10. Hoshino Y., Shiva S. Light modulation by transverse electric field induced oil surface deformation // Appl. Phys. Lett.—1989.—55, N 11.—P. 1056.
11. Brinker W., Gerhard-Multhaupt R., Mozlow W.-D., Tepe R. Deformation behavior of thin viscoelastic layers used in an active matrix-addressed spatial light modulator // Proc. Soc. Photo-Opt. Instrum. Eng.—1988.—1018.—P. 79.
12. Градштейн И. С., Рыжик И. М. Таблицы интегралов, сумм, рядов и произведений.—М.: Физматгиз, 1963.
13. Hussain M. A., Pu S. L. Dynamic stress intensity factors for an unbounded plate having collinear cracks // Eng. Fract. Mech.—1972.—40, N 4.—P. 865.

14. Ландау Л. Д., Лифшиц Е. М. Электродинамика сплошных сред.—М.: Наука, 1982.
15. Вессонов Л. А. Теоретические основы электротехники: Электромагнитное поле.—М.: Высш. шк., 1986.
16. Hess K., Dandliker R., Thalmann R. Deformable surface spatial light modulator // Opt. Eng.—1987.—26, N 5.—P. 418.

*Поступила в редакцию 24 декабря 1992 г.*

---

---

---

**Реклама продукции в нашем журнале — залог Вашего успеха!**