

УДК 621.371, 537.86

ПРАКТИЧЕСКАЯ РЕАЛИЗАЦИЯ ФОТОУПРАВЛЯЕМОГО ЭКРАНА НА ОСНОВЕ ЧАСТОТНО-ИЗБИРАТЕЛЬНОЙ ПОВЕРХНОСТИ

В. Н. Кисель¹, И. А. Рыжиков¹, Ю. В. Трофимов²

¹ Институт теоретической и прикладной электродинамики РАН

² Центр светодиодных и оптоэлектронных технологий, РНПУП НАН Беларуси

Статья поступила в редакцию 16 апреля 2016 г.

Аннотация. Разработана конструкция частотно-селективного экрана с управляемой радиопрозрачностью. Изменение коэффициента прохождения экрана осуществляется с помощью светодиодной излучающей панели. В статье обсуждаются особенности настройки макета экрана, приводятся результаты экспериментальных исследований частотных и угловых характеристик макетов в 10-см диапазоне длин волн.

Ключевые слова: частотно-избирательная поверхность, управляемая прозрачность, экран, антенна.

Abstract. Design of the frequency-selective screen with controllable transparency at radio frequencies is developed. Variation of the transmission coefficient is achieved by the use of a light-emitting diode (LED) panel. The peculiarities of the screen tuning are discussed, the results of experimental investigations of the frequency and angular performance of the screen in the S band are also shown.

Key words: frequency selective surfaces, controllable transparency, screen, antenna.

Введение

Известно [1], что в целях снижения радиолокационной заметности антенн применяются экраны, степень радиопрозрачности которых зависит от частоты или от управляющего воздействия. Кроме того, подобные экраны могут применяться для улучшения других параметров излучающих систем (например, показателей электромагнитной совместимости). Снижение заметности антенны

достигается за счет ее размещения в оболочке-экране, специальная форма которого обеспечивает меньшее рассеяние в обратном направлении по сравнению с незащищенной антенной, в частном случае экран может быть совмещен с радиопрозрачным обтекателем антенны.

Для обеспечения экранирования в диапазоне собственных рабочих частот антенны необходимо использовать управляемые экраны, степень радиопрозрачности которых может переключаться оператором с помощью какого-либо воздействия, например, светового потока. Пример технического решения такого рода [2] - нанесение на внутреннюю поверхность обтекателя антенны фоточувствительной пленки, поверхностное сопротивление которой зависит от уровня освещенности. К сожалению, существуют пока еще не преодоленные технологические трудности по созданию пленки с требуемым диапазоном изменения поверхностного сопротивления и необходимыми эксплуатационными параметрами.

Альтернативным техническим решением может служить экран, основой которого является на частотно-избирательная поверхность (ЧИП) с системой периодических отверстий определенной формы, настроенных так, чтобы пропускать электромагнитные волны в узкой полосе собственных частот локатора; для электромагнитных волн других частот такой экран работает как отражающий. Введя в эти отверстия (открытые резонаторы) управляющие элементы (УЭ), можно по желанию делать его непрозрачным и в диапазоне рабочих частот локатора. В качестве УЭ можно использовать переключательные диоды (*p-i-n* диоды), микроэлектромеханические (МЭМС) переключатели, фоточувствительные устройства.

У каждого из перечисленных вариантов есть свои достоинства и недостатки. Так, использование микропереключателей и *p-i-n* диодов связано с необходимостью подведения к ним управляющего сигнала (электрического напряжения) через ленточные проводники или иные токопроводящие конструкции. Соответствующие конструктивные решения могут ухудшить радиопрозрачность экрана в «открытом» состоянии, когда он должен оказывать

минимальное влияние на характеристики антенны. Кроме того, стоимость этих устройств довольно высока, что с учетом требуемой высокой плотности их размещения (до 10 шт. на квадратную длину волны) и значительной поверхности экрана делает конструкцию очень дорогой. Фоточувствительные элементы, наоборот, не требуют подвода электрического управляющего сигнала, характеризуются низкой стоимостью, могут быть изготовлены в едином технологическом процессе. Поэтому, несмотря на потенциально лучшие электрофизические свойства экранов с электронно-управляемыми устройствами, имеет смысл отрабатывать конструкции и управляемых поверхностей с фоточувствительными элементами.

2. Оработка фотоуправляемых элементов на малоразмерных макетах частотно-избирательной поверхности

В ходе разработки фотоуправляемого экрана было изготовлено несколько малоразмерных макетов, конструкция которых изображена на рис. 1.

На этих небольших образцах отрабатывалось решение ряда практических задач, в числе которых:

- выбор и доработка технологии изготовления щелевой структуры и установки фотоуправляемых элементов (ФУЭ);
- разработка методики контроля резонансной частоты и полосы пропускания отдельных щелевых элементов и макета в целом;
- реализация различных способов подстройки резонансной частоты отдельных щелей, необходимость которой вызвана технологическим разбросом параметров элементов;
- уточнение ожидаемых характеристик полноразмерного экрана (резонансная частота, полоса пропускания, начальные потери, динамический диапазон управления).

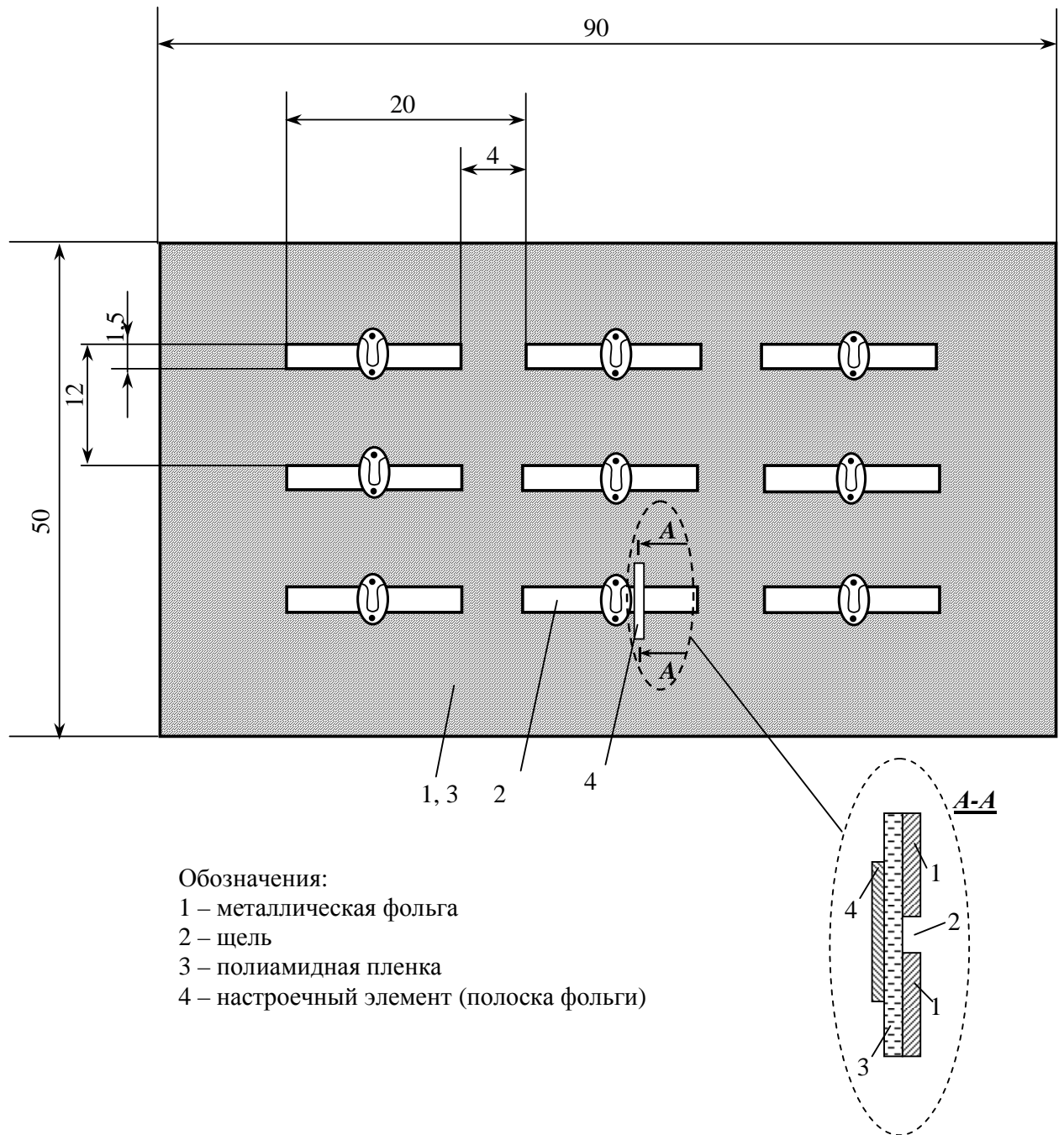


Рис. 1. Конструкция малоразмерных макетов управляемого экрана и узел настройки щели на требуемую резонансную частоту (показан в разрезе)

Фотоуправляемый элемент представлял собой доработанный фоторезистор, серийно изготавливаемый путем нанесения металлизации типа встречно-штыревого преобразователя) на поверхность фоточувствительной пленки из *CdSe*. Целью доработки было уменьшение собственной емкости элемента, чтобы обеспечить возможность его работы в желаемом диапазоне

частот (2-4 ГГц). Поскольку основной вклад в собственную емкость ФУЭ вносит встречно-штыревая структура, ее площадь была уменьшена путем механического удаления металлизации с периферийных боковых областей элемента. В результате удалось снизить типичное значение емкости ФУЭ с 1,5...2 пФ до 0,5...0,7 пФ ценой некоторой (допустимой) потери фоточувствительности.

Для измерения емкости ФУЭ была разработана и собрана установка, состоящая из панорамного измерителя коэффициента прохождения, детекторов и измерительного стола. На измерительном столе (см. схему, рис. 2) были установлены два зонда (передающий и приемный), между которыми размещался кольцевой резонатор с включенным в него испытуемым ФУЭ.

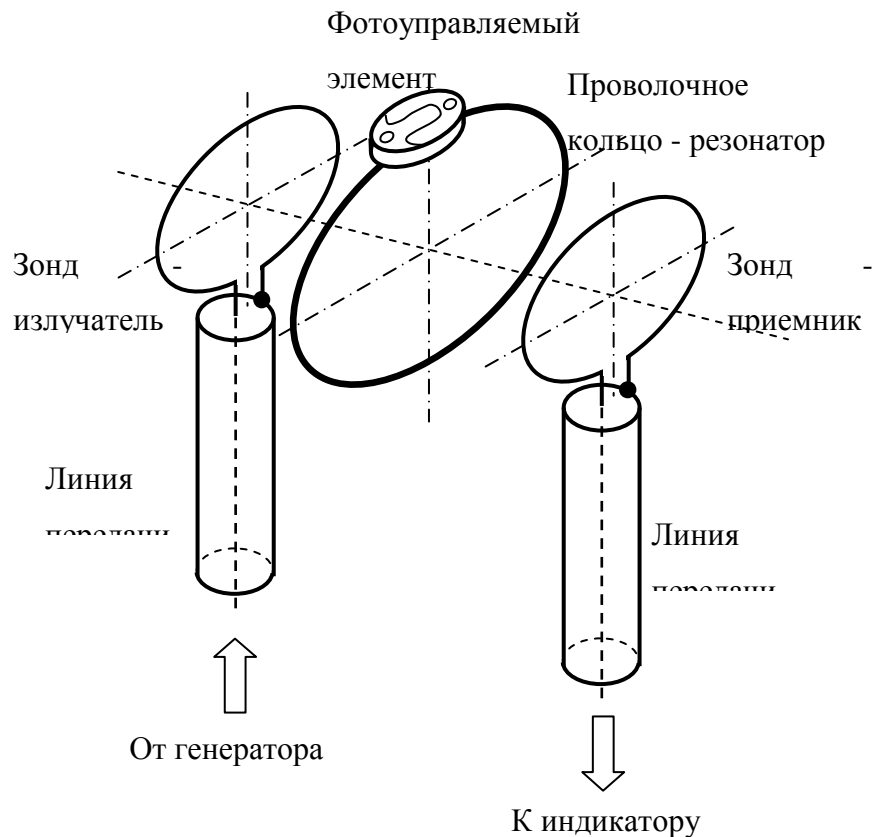


Рис. 2. Схема измерения собственной емкости фотоуправляемого элемента

С помощью панорамного индикатора анализатора цепей по максимуму резонансной кривой коэффициента передачи такой системы измерялась резонансная частота кольцевого резонатора с нагрузкой в виде ФУЭ, из

которой расчетным путем определялось значение емкости элемента. Измерения проводились при полном затемнении ФУЭ, чтобы исключить влияние потерь в освещенной фоточувствительной пленке на резонансные свойства нагруженного кольца. Эта же установка использовалась при контроле собственной емкости ФУЭ и отбраковке отдельных элементов в ходе их доработки.

Практика изготовления макетов показала, что ФУЭ имеют значительный разброс параметров (в частности, собственной емкости). Этот разброс удалось значительно уменьшить путем частичного удаления металлизации фоточувствительной пленки, однако свести его к нулю, конечно, невозможно. Более того, в течение одного-двух суток после механической обработки, как правило, наблюдался некоторый дрейф параметров элементов. Несколько изменялись параметры ФУЭ и в результате их установки в щелевую структуру, вероятно, за счет нагрева при пайке. Случайное изменение емкости ФУЭ приводит к тому, что щели в структуре управляемого экрана оказываются расстроенными по частоте друг относительно друга, в результате чего характеристики экрана ухудшаются. В первую очередь, это проявляется в искажении частотной зависимости коэффициента прохождения электромагнитной волны через экран и в увеличении начальных потерь (в «затемненном» состоянии ФУЭ). Этими обстоятельствами была вызвана необходимость окончательной настройки экрана, т.е. подгонка резонансной частоты каждой щели к одному и тому же значению уже после установки ФУЭ.

Для управления резонансной частотой щели был предложен способ внесения в щелевой резонатор небольшой дополнительной емкости за счет размещения вблизи ФУЭ специального настроечного элемента. Настроечный элемент был выполнен в виде полоски из проводящей фольги, отделенной от металлической поверхности щелевой структуры тонким слоем диэлектрика (см. рис. 1 и рис. 7б ниже). Варьируя размеры полоски и изменяя тем самым полную емкость нагрузки щелевого резонатора, можно было снизить резонансную частоту до требуемого значения, одинакового для всех щелей. Контроль

резонансной частоты осуществлялся с помощью специально сконструированного зонда, присоединенного к детектору панорамного индикатора (рис. 3).

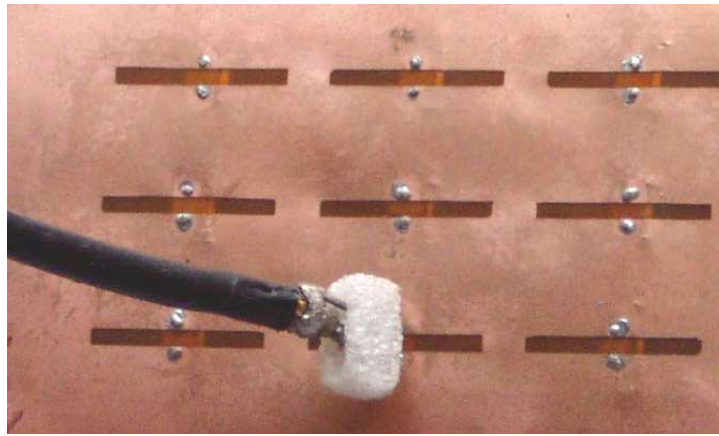


Рис. 3. Контроль резонансной частоты отдельной щели с помощью зонда

Частотные характеристики нескольких отдельных щелей одного из макетов М1 до и после их настройки описанным способом изображены на рис. 4. Видно, что благодаря этой операции удается добиться довольно близких частотных зависимостей для каждой из щелей.

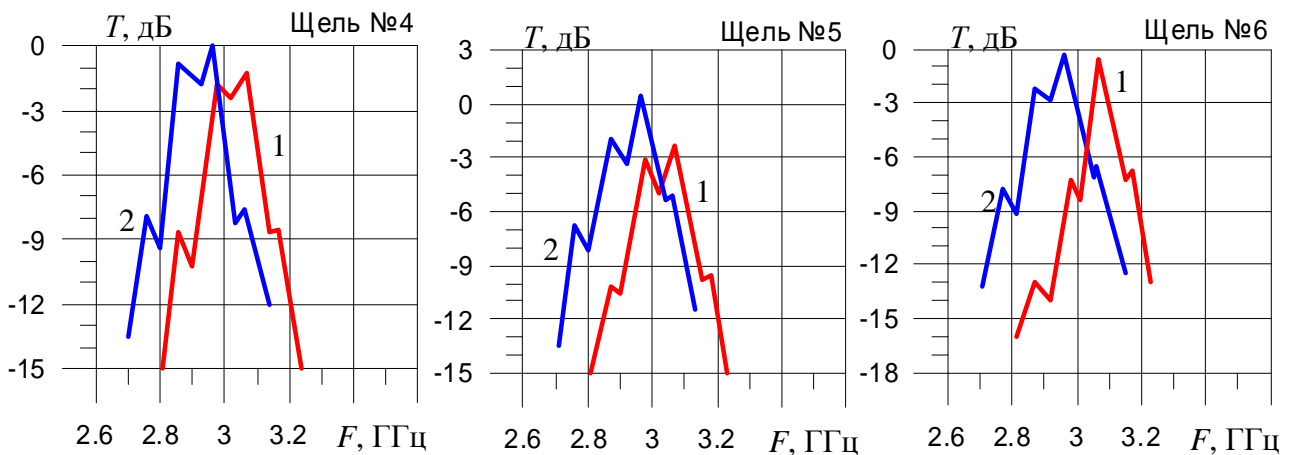


Рис. 4. Частотные характеристики отдельных щелей малоразмерного макета до и после настройки (кривые 1 и 2 соотв.)

Отметим, что в процессе настройки желательно исключить влияние щелей друг на друга, поэтому при настройке каждого из щелевых резонаторов все близлежащие щели перекрывались металлическими накладками.

Измерение характеристик малоразмерных макетов экранов проводилось с помощью панорамного индикатора ослабления. Частотно-избирательная поверхность (ЧИП) в сборе со светоизлучающей панелью устанавливалась в зазор между фланцами волноводов, которые передавали СВЧ энергию от генератора к индикатору. Радиопрозрачная светоизлучающая панель изготовлена из полиметилметакрилата толщиной 5 мм. Конструкция панели обеспечила равномерную засветку всей ее рабочей поверхности. Источником оптического излучения служили светодиоды, установленные по периметру панели. Максимум спектральной плотности излучения светодиодов соответствовал длине волны около 650 нм (красный цвет). В экспериментах использовались светодиодные панели двух типов: одна из них, жесткая по конструкции, была выполнена из рассеивающего оптическое излучение молочно-белого матового пластика (СДП-1); вторая (СДП-2) – гибкая, изготовлена из прозрачного пластика, рассеяние светового потока обеспечивалось размещением дискретных матово-белых площадок небольшого размера по поверхности экрана с требуемой (переменной) плотностью.

Пример измеренных частотных характеристик малоразмерного макета приведен на рис. 5. Здесь кривыми 1 и 2 обозначены характеристики экрана, полученные до и после настройки щелевых резонаторов с помощью настроечных элементов при выключенном источнике оптического излучения. Видно, что в результате проведенной настройки частотная характеристика экрана значительно улучшилась, начальные потери снизились с 4,5 до 2,5 дБ.

На рис. 6 совмещены частотные характеристики коэффициентов прохождения двух настроенных малоразмерных макетов М1 (кривые 1,3) и М2 (кривые 2,4) в сборе со светоизлучающей панелью при включенном (кривые 1,2) и выключенном (кривые 3,4) источнике оптического облучения. Видно, что характеристики макетов довольно близки (небольшая разница в центральной частоте вызвана тем, что подгонка проводилась к разным значениям емкостей ФУЭ), начальные потери составляют около 2,5 дБ, динамический диапазон

управления даже при использованном источнике освещения низкой интенсивности достигает 9-10 дБ.

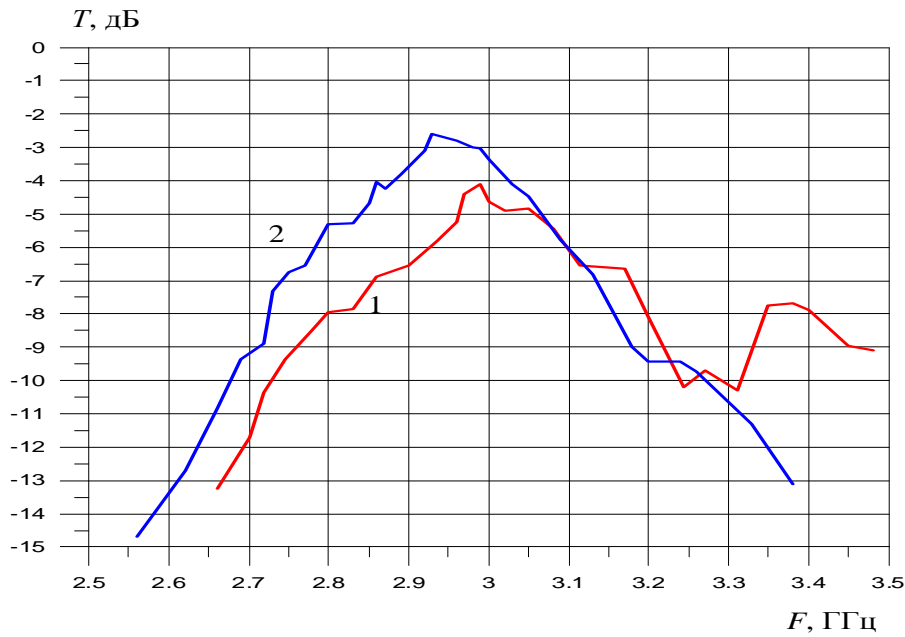


Рис. 5. Частотные характеристики одного из малоразмерных макетов управляемого экрана до (кривая 1) и после (кривая 2) настройки ФУЭ

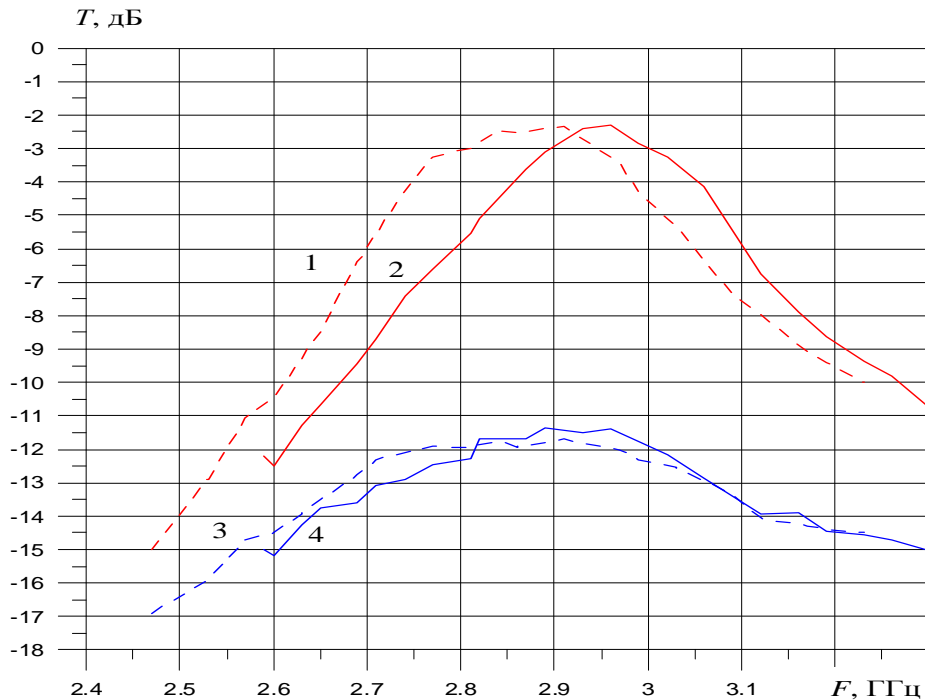


Рис. 6. Частотные характеристики настроенных малоразмерных макетов управляемого экрана М1 (кривые 1, 3) и М2 (кривые 2, 4) в сборе со светоизлучающей панелью; 1, 2 – СДП-1 в выключенном состоянии; 3, 4 – СДП-1 во включенном состоянии.

3. Практическая конструкция фотоуправляемой частотно-избирательной поверхности

Конструкция полноразмерного макета управляемого экрана размером 300x210 мм изображена на рис. 7.

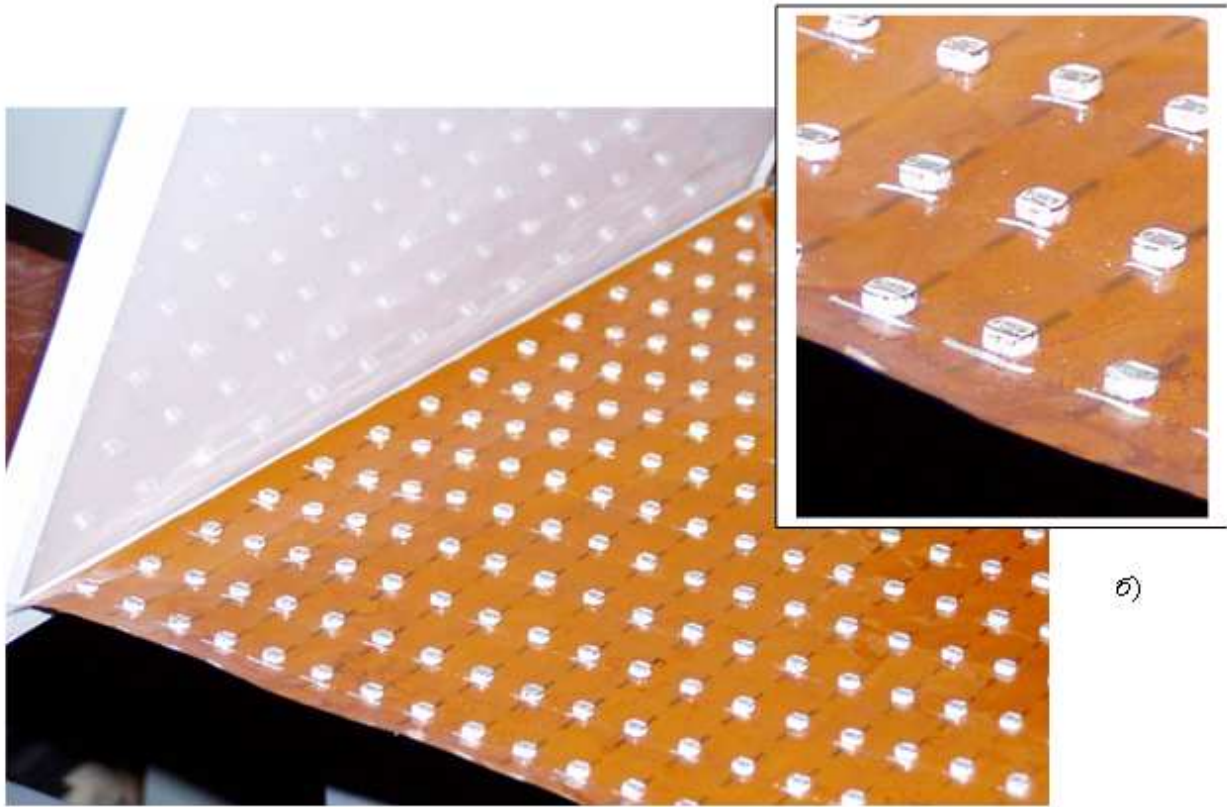


Рис. 7. Конструкция управляемого экрана (а), фотоуправляемые и настроечные элементы, установленные в щелях ЧИП (б)

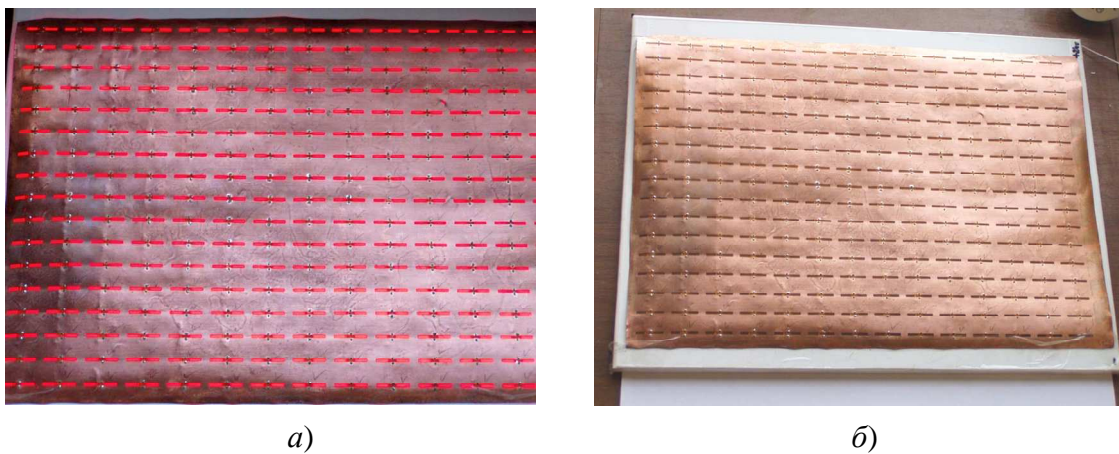


Рис. 8. Фотоуправляемый экран в сборе со светодиодной излучающей панелью СДП-1 (а – СДП-1 вкл., б – СДП-1 выкл.)

На рис. 8 этот же экран показан во включенном (а) и выключенном (б) состояниях. Экран состоит из светодиодной панели СДП-1 или СДП-2 и щелевой частотно-избирательной поверхности с нагрузками из ФУЭ и настроечных элементов. При изготовлении этого макета применялись те же (отработанные на малоразмерных макетах) операции по доработке, установке ФУЭ и окончательной настройке экрана. На рис. 9 показан этот же экран с панелью СДП-2, установленный перед рупором панорамного измерителя коэффициента отражения (при включенной и выключенной панели).



Рис 9. Измерение частотной зависимости коэффициента отражения электромагнитной волны от экрана (а - СДП-2 выкл., б – СДП-2 вкл.)

Измерения показали, что на резонансной частоте отражение от экрана практически отсутствует (коэффициент отражения $R \approx -19$ дБ). Это означает, что начальные потери экрана на прохождение электромагнитной волны при выключенной панели обусловлены именно диссипативными потерями энергии в его элементах, а не связаны с ее отражением от экрана из-за, например, плохого согласования. Поэтому, применяя более качественные ФУЭ, можно добиться уменьшения начальных потерь.

Измерение коэффициента прохождения электромагнитной волны проводилось с помощью установки, показанной на рис. 10.

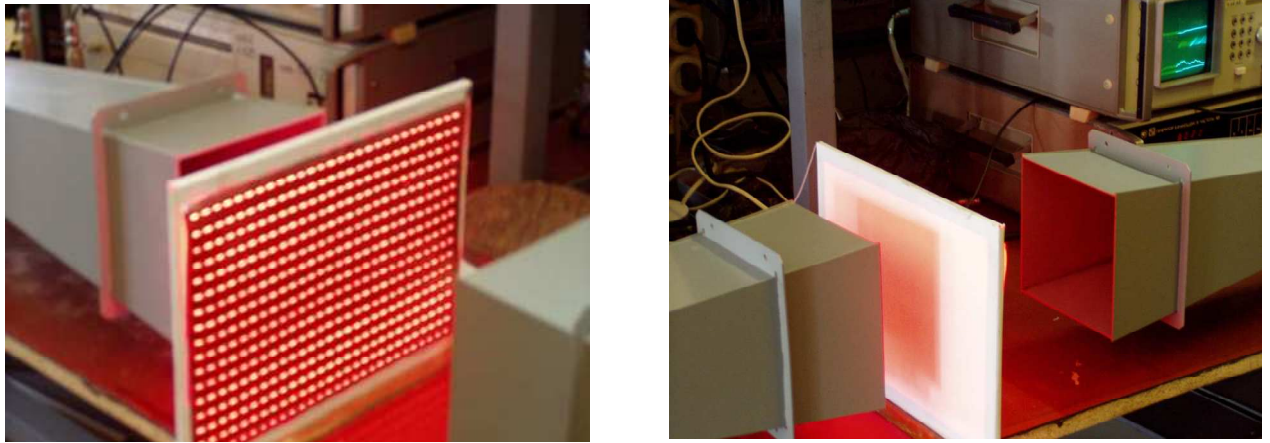


Рис. 10. Измерение коэффициента прохождения экрана

Измеренные частотные характеристики экрана показаны на рис. 11. Здесь кривой 1 изображена зависимость, измеренная без светоизлучающей панели после доработки, предварительной настройки и отбраковки ФУЭ перед окончательной настройкой экрана, т.е. в данном случае исходные параметры всех ФУЭ (перед их установкой в экран) были близки друг к другу. Кривой 2 показана частотная зависимость этой же структуры в сборе с панелью СДП-1 (видно, что присутствие панели несущественно влияет на характеристики щелевой структуры). Наконец, кривая 3 – частотная характеристика экрана после его окончательной настройки.

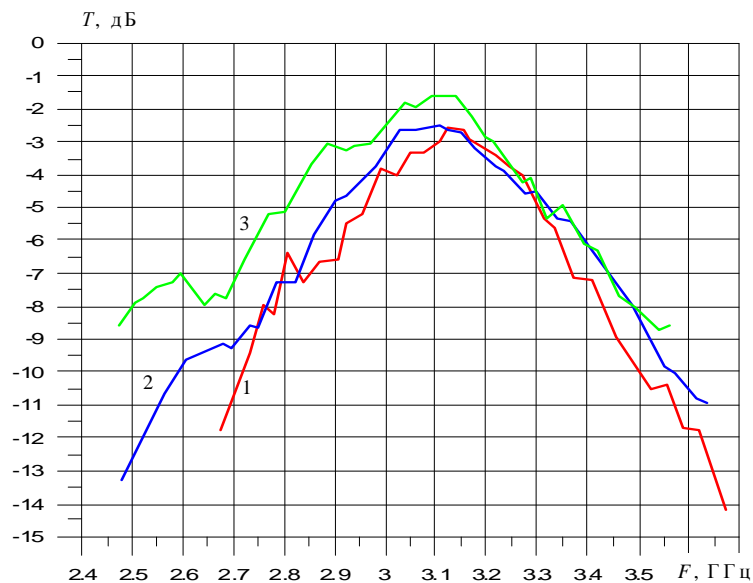


Рис. 11. Частотные характеристики коэффициента прохождения экрана (1 – без дополнительной подстройки ФУЭ, без СДП; 2 – то же, в сборе с СДП-1 (выкл.); 3 - с подстройкой ФУЭ, в сборе с СДП-1 (выкл.))

Видно, что в результате подстройки удалось несколько расширить полосу пропускания и снизить начальные потери, которые в данном случае составляют около $-1,5$ дБ. Аналогичные (и близкие) зависимости получены и для экрана в сборе с панелью СДП-2.

Подчеркнем, что при включенных светоизлучающих панелях (как СДП-1, так и СДП-2) экран оказывается практически полностью непрозрачным для электромагнитного излучения данного частотного диапазона (2-4 ГГц), сигнал на входе приемника практически соответствовал уровню шумов аппаратуры (поэтому он и не изображен на графиках). Таким образом, в полноразмерном макете управляемого экрана удалось добиться динамического диапазона управления порядка 30 дБ при падении волны по нормали к экрану.

Наконец, на рис. 12 показан процесс измерений при исследовании угловых зависимостей.

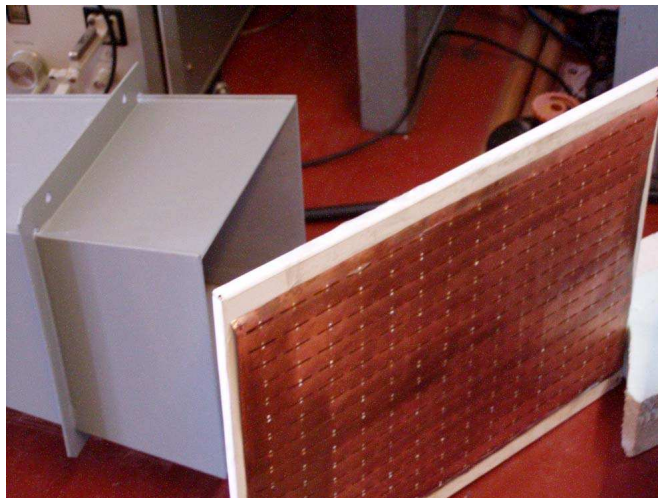


Рис. 12. Измерение угловой характеристики коэффициента прохождения

Наиболее сильно коэффициент прохождения изменяется при повороте экрана в плоскости, содержащей щели (именно этот поворот показан на рис. 5.33). Соответствующие частотные зависимости показаны на рис. 13.

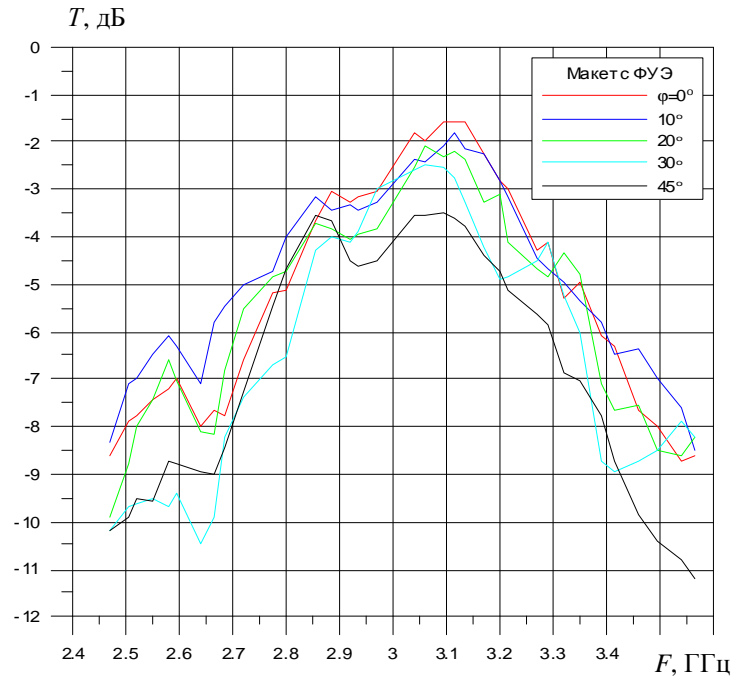


Рис. 13. Частотные зависимости коэффициента прохождения T (в дБ) при различных углах поворота экрана φ в плоскости расположения щелей

Из этих зависимостей видно, что вплоть до углов поворота экрана 25° - 30° уменьшение коэффициента прохождения не превышает 1 дБ (что хорошо согласуется с теоретическими данными), и лишь при приближении к углам порядка 45° заметно существенное ослабление прошедшего сигнала. Кроме того, ухудшается (снижается до 15-20 дБ) динамический диапазон управления коэффициентом передачи. Этот результат показывает, что подобный экран для реальной антенны может быть изготовлен в виде криволинейной поверхности (например, биконуса), чтобы обеспечить нужные угловые соотношения для падения на его поверхность волны, излученной антенной.

4. Выводы

Таким образом, на макетах плоских управляемых структур отработан способ размещения фоточувствительных элементов для управления прохождением энергии электромагнитного поля. Результаты измерений соответствуют теоретическим и расчетным предположениям. Показано, что

использование дискретных фоточувствительных элементов в составе частотно-избирательной поверхности позволяет добиться изменения ее коэффициента прохождения не менее чем на 25-30 дБ при использовании в качестве управляющего воздействия относительно маломощного светового потока. Начальные потери (при выключенном источнике оптического излучения) определяются качеством фотоуправляемых элементов. Другим ограничивающим фактором является сравнительно высокая собственная емкость ФУЭ и технологический разброс их параметров. Переход к специальной (микро-) технологии изготовления ФУЭ путем нанесения металлизации по заданному шаблону на фоточувствительную пленку позволит снизить емкость, добиться идентичности параметров различных ФУЭ и за счет этого – уменьшить трудоемкость настройки (или вообще ее исключить) и перейти к более высоким рабочим частотам.

Литература

1. Radar cross section/ E.F. Knott, J.F. Shaeffer, M.T. Tuley. – 2nd ed. Artech House, Inc., Boston-London. – 1993.
2. Martin M.T., Duhl M.L. Method and apparatus using photoresistive materials as switchable EMI barriers and shielding. US Patent No.5278562, Jan.11,1994. H01Q 17/00.