

Ю. А. ВОРОНОВ, Р. Е. КАШЛАТЫЙ, С. В. КРУГЛИКОВ,
О. Р. МОЧАЛКИНА
(Москва)

ПОРОГОВАЯ ЧУВСТВИТЕЛЬНОСТЬ КВАЗИСТАТИЧЕСКОЙ МОПТ-ФОТОДИОДНОЙ МАТРИЦЫ

Кремниевая фотоприемная МОПТ-фотодиодная матрица, работающая в квазистатическом режиме, является одним из вариантов фотоприемных матриц с накоплением заряда. Особенность данного режима состоит в разделении во времени сигналов стирания и считывания информации, а также в возможности постоянного слежения за напряжением на емкости фотодиода (накопителе). Организация и фотоэлектрические параметры такой матрицы рассмотрены в работах [1, 2].

Повышение объема или информационной емкости (количества ячеек) фотоматриц усложняет их конструктивно-топологическую разработку, эффективность которой в данном случае зависит от установления влияния на фотоэлектрические характеристики следующих факторов: паразитных элементов, возникающих при объединении фоточувствительных ячеек на одном кристалле; геометрических размеров элементов, входящих в состав фоточувствительной ячейки; качества технологического процесса, определяющего такие параметры, как минимально допустимые толщины диэлектрических пленок, паразитные емкости МОП-транзисторов и т. д.

В принципе имеются два взаимно дополняющих пути разработки интегральных фотоматриц большого объема: технологический и машинный эксперименты. Несмотря на относительную дешевизну и эффективность машинного анализа фотоматричных БИС по сравнению со стоимостью разработки опытных образцов и выпуском опытных партий, в известной литературе по фотоэлектрическим преобразователям этот подход практически не рассмотрен.

Задача данной работы заключается в проведении машинного анализа квазистатических МОПТ-фотодиодных матриц с целью получения количественных данных о взаимосвязи структурно-топологических характеристик матриц с одним из основных фотоэлектрических параметров — пороговой чувствительностью, а также о зависимости пороговой чувствительности от объема матриц.

Для решения этой задачи была разработана модель ячейки фотоматрицы с учетом возникающих при объединении ячеек в монолитную матрицу паразитных элементов (рис. 1), к которым относятся суммарные емкости шин питания, стирания, разряда и адреса, зависящие от объема матрицы. В модели $T_1 - T_3$ — МОП-транзисторы, составляющие ячейку фотоматрицы; $C_1 - C_6$ — емкости затвор — исток, затвор — сток этих транзисторов. Данные емкости, как и все остальные емкости, представляющие собой МОП-структуры, при анализе модели считались постоянными. Такими емкостями в модели ячейки являются суммарные емкости шин стирания $C_{ст}$ и питания $C_{п2}$. Эти емкости пропорциональны объему матрицы.

Области стока и истока МОП-транзисторов, а также токоведущие шины, выполненные в виде диффузионных областей, представлены в модели ячейки диодами. При работе ячейки все эти диоды имеют обратное смещение и представляют собой фактически нелинейные емкости, зависящие от приложенного напряжения. Такими элементами служат область истока транзистора T_3 — фотодиод $C_{фд}$, сток транзистора $T_1 - C_7$ и емкости шин разряда C_p , адреса C_a и питания $C_{п1}$. Причем емкости C_p и C_a пропорциональны количеству ячеек в строке и столбце соответственно, а $C_{п1}$ — объему матрицы. Шина питания при однослойной металлизации состоит из металлизированных полос и скрытых диффузион-

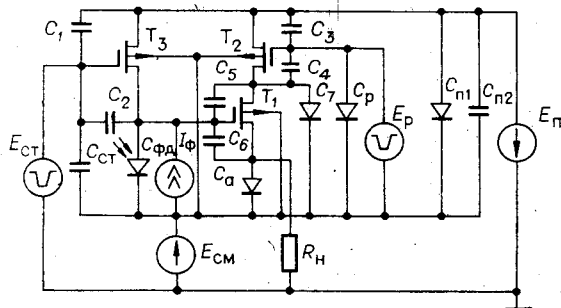


Рис. 1. Модель ячейки фотоприемной матрицы.

ных областей, служащих для развязки взаимно перпендикулярных токоведущих дорожек. Поэтому общая емкость между шиной питания и подложкой представлена двумя элементами — $C_{п1}$ и $C_{п2}$.

Кроме этих элементов в модель ячейки введены сопротивление нагрузки R_n (общее для столбца матрицы), источник тока I_ϕ , отражающий действие фототока на фотодиод, источники питания E_π и смещения $E_{см}$, а также источники напряжения стирания $E_{ст}$ и опроса E_p . При расчете использовались следующие значения источников напряжений: $E_\pi = -6$ В, $E_{см} = +5$ В, $E_{ст} = E_p = -12$ В.

Анализ модели проводился с использованием программы анализа электронных схем АРОПС [3] на ЭВМ ЕС-1033. Данная программа содержит модели МДП-транзисторов, постоянных емкостей, диодов, резисторов, постоянных и импульсных источников токов и напряжений и других элементов. Поскольку модель МДП-транзистора, входящая в программу АРОПС, является, по существу, моделью только области канала МДП-транзистора, то емкости затвор — исток, затвор — сток, диоды исток — подложка, сток — подложка необходимо вводить в анализируемую электрическую схему как самостоятельные элементы. Это было учтено при составлении модели ячейки фотоприемной матрицы.

В модели ячейки элементы, обусловленные объединением ячеек в матрицу, отражают только пассивное влияние матрицы на характеристики ячейки. Однако в фотоматрицах возможно и активное влияние ячеек друг на друга, происходящее при опросе ячеек, расположенных в одной строке или одном столбце с анализируемой ячейкой [4]. Чтобы установить активное влияние соседних ячеек матрицы на фотоэлектрические характеристики анализируемой ячейки, модель на рис. 1 была дополнена двумя ячейками, находящимися в одной строке и одном столбце с анализируемой ячейкой.

Проведен расчет такой расширенной модели, в результате которого получены временные диаграммы напряжения на емкости фотодиода в течение цикла, включающего опрос как анализируемой, так и соседних ячеек.

Анализ временных диаграмм показывает, что активное влияние соседних ячеек практически отсутствует, т. е. когда опрашиваются соседние ячейки, расположенные в одной строке или одном столбце с анализируемой, необратимых изменений напряжения на емкости ее фотодиода не происходит. Это является одним из преимуществ квазистатических МОПТ-фотодиодных матриц по сравнению с матрицами на биполярных фототранзисторах [4]. Поэтому при дальнейшем расчете использовалась модель фоточувствительной ячейки квазистатической МОПТ-фотодиодной матрицы, представленная на рис. 1.

Расчет модели проведен для фотоприемных матриц объемом 16×16 , 32×32 и 128×128 ячеек при длине каналов МОП-транзисторов $L=3$ мкм.

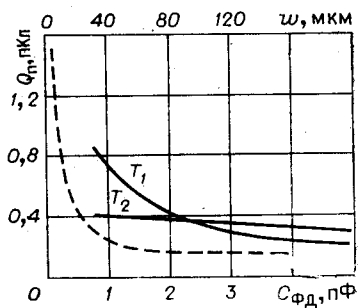


Рис. 2. Зависимость пороговой чувствительности от емкости фотодиода (штриховая кривая) для $x_d = 0,1$ мкм, $U_{пор} = -1$ В, $E_{см} = 5$ В, $C_{зк} = C_{зс} = 0,1$ пФ и размеров МОП-транзисторов (сплошная кривая) для $x_d = 0,1$ мкм, $U_{пор} = -2$ В, $E_{см} = 5$ В, $C_{фд} = 1$ пФ, $C_{зк} = C_{зс} = 0,1$ пФ, $L = 3$ мкм.

Объем матрицы задавался изменением параметров емкостей $C_{ст}$, C_a , C_p , $C_{п1}$ и $C_{п2}$. Численные значения параметров емкостей, приходящиеся на одну ячейку фотоматрицы, следующие: $C_{ст0} = 0,4$ пФ, $C_{a0} = 0,25$ пФ, $C_{p0} = 0,5$ пФ, $C_{п10} = 0,5$ пФ, $C_{п20} = 0,4$ пФ. Эти данные соответствуют шагу ячеек 250 мкм по обеим осям. Параметры нелинейных емкостей приведены для напряжения на $p-n$ -переходе, равного нулю.

В результате расчета получены временные диаграммы выходного напряжения для различных величин заряда, генерируемого светом на емкости фотодиода (фотозаряд). По диаграммам построены зависимости амплитуды выходного напряжения от фотозаряда, пропорционального энергии падающего света*. На основе этих зависимостей для матриц объемом 16×16 , 32×32 и 128×128 элементов рассчитаны значения пороговой чувствительности. Под пороговой чувствительностью понимался фотозаряд, генерируемый на емкости фотодиода в 1 пФ и приводящий к уменьшению выходного напряжения по сравнению с темновым значением на заданную величину. Выбор этой величины определяется типом и параметрами устройств, обрабатывающих выходные сигналы с фотоматрицы. В данном случае величина уменьшения выходного напряжения под действием света по сравнению с темновым значением равна 100 мВ. При этом полезный сигнал может быть уверенно выделен на фоне помех с помощью серийных интегральных компараторов с 3—5-кратным запасом на зону нечувствительности компаратора.

На рис. 2 представлена зависимость пороговой чувствительности $Q_{п}$ от величины емкости фотодиода-накопителя. Резкое увеличение порога чувствительности начинается при емкостях, меньших 1 пФ, что объясняется более ощутимым влиянием паразитных емкостей. Действительно, фототок, соответствующий определенной энергии света, пропорционален площади фотодиода, а доля паразитных емкостей в общей емкости, разряжаемой фототоком, увеличивается с уменьшением емкости фотодиода.

Влияние размеров (ширина канала w) транзисторов на пороговую чувствительность показано на том же рисунке для матрицы объемом 128×128 ячеек. Оно обусловлено снижением под действием света напряжения на затворе усилительного транзистора T_1 . При этом, если снижение напряжения на затворе вызывает более резкое уменьшение тока в выходной цепи (транзистор с большей крутизной), то меньшие изменения энергии света приведут к большей разнице в выходном сигнале (порог чувствительности меньше). В наибольшей мере на пороговую чувствительность влияет изменение ширины канала усилительного транзистора T_1 . Влияние размеров ключевого транзистора T_2 существенно меньше, поскольку в режиме работы ячейки этот транзистор обладает более низким сопротивлением.

Установление значимости таких параметров, как толщина подзатворного диэлектрика x_d , пороговое напряжение МОПТ $U_{пор}$, емкости перекрытий затвор — сток и затвор — исток, позволяет дать правильную оценку требований к качеству технологического процесса.

С уменьшением порогового напряжения порог чувствительности падает (рис. 3), поскольку транзисторы с меньшим $U_{пор}$ имеют при некотором напряжении на затворе, определяемом энергией света, большую крутизну. Увеличением крутизны объясняется также и менее резкое изменение порога чувствительности от $U_{пор}$ для меньших толщин подзатворного диэлектрика.

Зависимость порога чувствительности от толщины подзатворного диэлектрика и емкостей перекрытий представлена на рис. 4. Влияние емкостей перекрытия транзистора T_1 обусловлено их включением параллельно емкости фотодиода. Для постоянного фототока изменение напряжения на емкости фотодиода меньше при больших емкостях пере-

* Связь между фотозарядом Q и энергией света E следующая: $Q = KE$, где K — абсолютная чувствительность; для рассматриваемых типов фотоматриц $K \approx 0,25$ А/Вт при длине волны, равной 0,63 мкм.

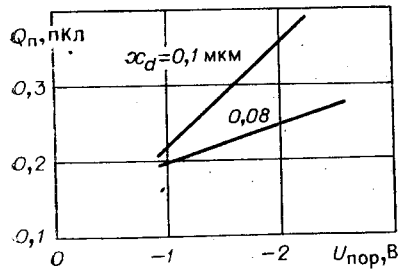


Рис. 3. Зависимость пороговой чувствительности от порогового напряжения МОП-транзисторов для $C_{фд}=1$ пФ, $C_{зп}=C_{зс}=0,1$ пФ, $E_{см}=5$ В.

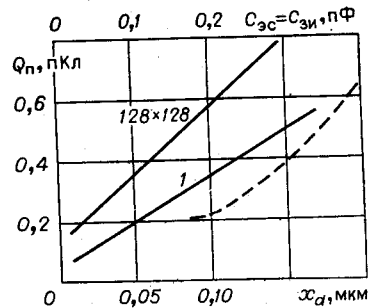


Рис. 4. Зависимость пороговой чувствительности от толщины подзатворного диэлектрика (штриховая кривая) для $U_{пор}=-1$ В, $C_{фд}=1$ пФ, $C_{зп}=C_{зс}=0,1$ пФ, $E_{см}=5$ В и емкостей перекрытий (сплошная кривая) для $U_{пор}=-1$ В, $C_{фд}=1$ пФ, $x_d=0,1$ мкм, $E_{см}=5$ В.

крытий. Кроме того, после окончания импульса стирания часть заряда с фотодиода переходит на емкости перекрытия, что уменьшает напряжение на фотодиоде и, следовательно, пороговую чувствительность. Для матриц большого объема (128×128 ячеек) по сравнению с единичной ячейкой порог чувствительности в зависимости от величины емкостей перекрытий растет несколько быстрее.

Наращивание объема фотоматриц, работающих в квазистатическом режиме, слабо влияет на величину выходного сигнала и пороговую чувствительность. Как видно из рис. 4, порог чувствительности возрастает примерно в 1,5 раза для матриц объемом 128×128 ячеек по сравнению с единичной ячейкой. Такая зависимость порога чувствительности от объема является весьма слабой по сравнению с матрицами на биполярных транзисторах [4]. Объясняется это различие тем, что в рассматриваемой ячейке выходной сигнал формируется на вершине импульса опроса, а не на его фронте. Отсюда затягивание фронтов опрашивающих (адресных) импульсов, происходящее с увеличением объема матрицы, слабо влияет на выходной сигнал и, следовательно, на пороговую чувствительность.

Проведенный анализ дал возможность получить количественные данные о взаимосвязи структурных параметров МОПТ-фотодиодных матриц и их пороговой чувствительности. Из анализа могут быть сделаны следующие выводы:

1. Зависимость пороговой чувствительности от емкости фотодиода позволяет установить оптимальные размеры накопителя. Уменьшение размеров накопителя до величин, меньших $\sim 10^4$ мкм², приводит к резкому возрастанию порога чувствительности (приблизительно в три раза при уменьшении площади накопителя от 100×100 мкм² до 50×50 мкм²). В то же время слабая зависимость порога чувствительности в области больших площадей накопителя (больше 150×150 мкм²) свидетельствует о возможности увеличения фотодиодов и шага между элементами, если это необходимо.

2. Порог чувствительности может быть снижен увеличением ширины канала усилительного МОП-транзистора (примерно в три раза при изменении ширины канала от 40 до 160 мкм), снижением толщины подзатворного диэлектрика (в два раза при изменении толщины диэлектрика x_d от 0,15 до 0,08 мкм) и порогового напряжения МОП-транзисторов (в два раза при изменении $U_{пор}$ от -2 до -1 В для $x_d=0,1$ мкм).

3. Снижению порога чувствительности способствует создание МОП-транзисторов с самосовмещающимися затворами с меньшими емкостями перекрытий (например, с использованием ионного внедрения примесей).

ЛИТЕРАТУРА

1. Матиенко Б. Г., Нестерихин Ю. Е. Многоэлементные фотоприемные матрицы для голограммных запоминающих и вычислительных устройств.— *Автометрия*, 1979, № 3.
2. Матиенко Б. Г. Исследование характеристик полупроводниковой фотоприемной матрицы.— *Автометрия*, 1979, № 3.
3. Фролкин В. Т. и др. Опыт эксплуатации комплекса программ автоматического расчета оптимальных параметров схем.— *Управляющие системы и машины*, 1977, № 6.
4. Воронов Ю. А., Мочалкина О. Р. Фотоэлектрические характеристики транзисторных матриц с накоплением заряда.— *Микроэлектроника*, 1980, т. 9, вып. 1.

*Поступила в редакцию 3 июля 1980 г.;
окончательный вариант — 16 июня 1982 г.*

УДК 543.42

В. И. МОШКИН
(Москва)

ИНТЕГРАЛЬНЫЕ МНОГОЭЛЕМЕНТНЫЕ ФОТОПРИЕМНИКИ В ТЕХНИКЕ СПЕКТРОСКОПИИ

В последние годы достигнуты значительные успехи в области создания интегральных многоэлементных фотоприемников (ИМФ) для энергетических измерений в видимой и инфракрасной областях спектра [1]. Наиболее перспективными ИМФ для использования в технике спектроскопии являются кремниконы [2] и фотодиодные линейки [3], которые уже нашли применение в многоканальных анализаторах спектра типа ОМА [4]. Применение ИМФ в технике спектроскопии вместо дискретных ФЭУ, фотодиодов и фотоэлементов позволяет повысить точность измерений, устранить подвижные механические элементы измерительных устройств, осуществить автоматизированную обработку измерений в реальном масштабе времени.

В настоящей работе рассматриваются вопросы методики спектральных измерений с помощью ИМФ, даются алгоритмы обработки результатов измерений и анализа их точности. Ранее эти вопросы в литературе, по существу, не рассматривались.

В общем случае ИМФ представляет собой регулярную матрицу или линейку N фотоприемных элементов, расположенных в выходной фокальной поверхности спектрального прибора (рис. 1, а). Фотоэлектрические сигналы, считываемые с элементов ИМФ, несут информацию о распределении интенсивности излучения $\Phi(x, y; t)$ в выходной фокальной поверхности спектрального прибора, которое задается сверткой инструментального контура $\phi(x, y)$ и истинного распределения интенсивности

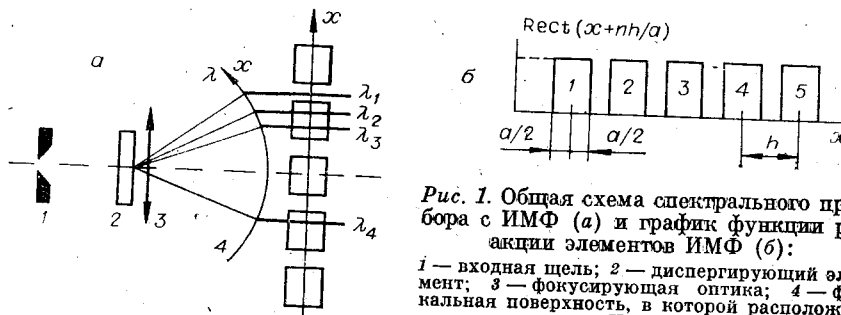


Рис. 1. Общая схема спектрального прибора с ИМФ (а) и график функции реакции элементов ИМФ (б):

i — входная щель; 2 — диспергирующий элемент; 3 — фокусирующая оптика; 4 — фокальная поверхность, в которой расположен ИМФ.