

УДК 621.383.4/5:621.384.3

ИССЛЕДОВАНИЕ ФОТОЭЛЕКТРИЧЕСКИХ РАЗМЕРОВ ЭЛЕМЕНТОВ В МАТРИЧНЫХ ИК-ФОТОПРИЕМНИКАХ

К. О. Болтарь, Н. И. Яковлева

Государственное унитарное предприятие «Начно-производственное объединение «Орион»»,
Москва, Россия

Экспериментально исследован метод восстановления функции распределения чувствительности по фотоприемнику по экспериментально измеренной зависимости сигнала от перемещения и известной функции распределения освещенности оптического зонда.

В связи с развитием в последние годы технологии фотоприемных «смотрящих» матриц (МФП) на основе CdHgTe в ИК-диапазоне спектра 3—5 и 8—14 мкм и увеличением числа элементов МФП до 128×128 , 384×288 и выше произошло существенное уменьшение геометрических размеров отдельно взятого фоточувствительного элемента (ФЧЭ) матрицы до величины $\sim 20 \times 20$ мкм². Традиционный метод измерения эффективного размера фоточувствительной площадки и фотоэлектрической взаимосвязи по ГОСТ 17772 накладывает ограничения на размеры пятна излучения оптического зонда, диаметр которого не должен превышать 0,2 геометрического размера ФЧЭ.

В длинноволновой ИК-области спектра 8—14 мкм, из-за дифракционной природы света размеры фотоприемника и оптического зонда оказываются сравнимыми даже при идеальном объективе. При сканировании ФЧЭ изображением светящейся щели с шириной, сравнимой с размером ФЧЭ, фотосигнал представляет собой не распределение чувствительности по площадке элемента, а свертку функции освещенности оптического зонда и функции распределения чувствительности по площадке элемента. Зависимость сигнала от перемещения изображения щели относительно ФЧЭ определяется интегралом

$$P(x) = \int_{-\infty}^{+\infty} S(x')E(x-x')dx', \quad (1)$$

который представляет собой одномерную свертку функции распределения чувствительности фотоприемника $S(x')$ и функции распределения освещенности в плоскости расположения фотоприемника $E(x)$.

В работе разработан и экспериментально исследован метод восстановления функции распределения чувствительности по фотоприемнику $S(x)$ по экспериментально измеренной зависимости сигнала от перемещения P_k и известной функции распределения освещенности оптического зонда E_k .

Суть метода хорошо известна: Фурье-преобразование свертки двух функций есть произведение Фурье-преобразований этих функций. Поэтому истинная функция распределения чувствительности по фотоприемнику $S(x)$ есть обратное преобразование Фурье частного от деления преобразования Фурье экспериментальной зависимости на преобразование Фурье функции распределения освещенности оптического зонда E_k .

При проведении вычислений зависимости $S(x)$ по формуле (1) необходимо преодолеть ряд трудностей. Математические трудности связаны с переходом от интегралов по непрерывным промежуткам к конечным выборкам, проводящим к

необходимости аподизации*. Экспериментальные трудности связаны с тем, что экспериментальные точки измерены с погрешностью, и при вычислении необходимо устранить появление побочных пиков. Метод реализован на IBM PC и производится в едином цикле с измерением фоточувствительной площадки на автоматизированной установке под управлением ЭВМ.

Измерения одномерного распределения чувствительности по площадке фотоприемника проводились на установке, блок-схема которой представлена на рис. 1.

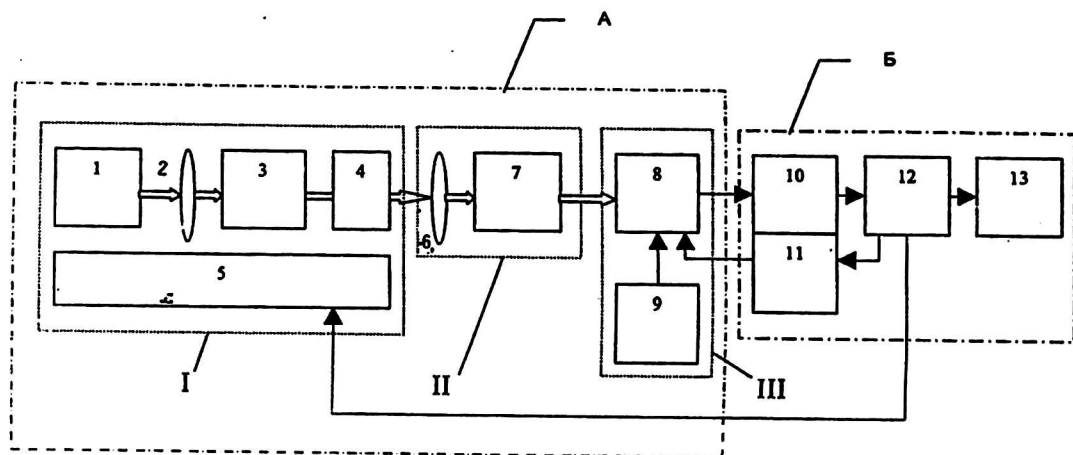


Рис. 1. Блок-схема установки для измерения распределения чувствительности по площадке фотоприемника:

- 1 — глобар; 2 — германиевая линза; 3 — модулятор; 4 — оптическая щель; 5 — каретка;
6 — зеркальный объектив; 7 — поворотное зеркало; 8 — МФП; 9 — координатный столик;
10 — блок усиления и предварительной обработки сигналов МФП; 11 — блок управления МФП;
12 — интерфейс; 13 — ЭВМ

ЭВМ в автоматическом режиме через интерфейс выдает команду на перемещение каретки. Расположенные на ней источник ИК-излучения, глобар и оптическая щель начинают перемещение относительно закрепленного на координатном столике МФП. ИК-излучение оптической щели фокусируется в плоскость расположения МФП с помощью зеркального объектива. С помощью ЭВМ, блока усиления и предварительной обработки сигналов МФП и аналого-цифрового преобразователя в интерфейсе по мере перемещения каретки относительно МФП происходит регистрация фотосигнала.

Восстановление распределения фоточувствительности проводится следующим образом. Для проведения преобразования Фурье экспериментальные данные, измеренные в дискретных точках k ($k = -N, \dots, N$) P_k , необходимо привести к периодическому виду: $P_{-N} = P_N$. Для этого P_k домножают на функцию [1] B_j , которая описывается формулой:

$$B_j = \begin{cases} 1 - 3N/4 < j < 3N/4 & |j| < 3N/4 \\ (N - |j|) / N & |j| > 3N/4 \end{cases} \quad (2)$$

* Белл Р. Дж. Введение в Фурье-спектроскопию. — М.: Мир, 1975.— 380 с.

Дискретное преобразование Фурье экспериментальных данных ρ_k запишем в виде:

$$\rho_k = \frac{1}{2N+1} \sum_{m=-N}^N P_m B_m \exp\left(\frac{-i2\pi mk}{2N+1}\right), \quad (3)$$

где m и k изменяются в промежутке $-N, \dots, N$.

Предварительные эксперименты показали, что функцию распределения энергетической освещенности в плоскости расположения фотоприемника можно заменить распределением Гаусса, где постоянная R_o — означает величину протяженности функции распределения энергетической освещенности, определяемую на уровне $\exp(-1/2)=0,606$ от максимума функции.

$$E_m = \exp\left(-\frac{m^2}{R_o^2}\right). \quad (4)$$

Фурье-преобразование от функции освещенности E имеет вид.

$$\varepsilon_k = \frac{1}{2N+1} \sum_{j=1}^{2N} E_m \exp\left(\frac{-i2\pi mk}{2N+1}\right). \quad (5)$$

В соответствии с теоремой о свертке [2] имеем соотношение $P_k = S_k \otimes \varepsilon_k^*$, где S_k — Фурье-преобразование функции распределения чувствительности по площади фотоприемника; E_k^* — комплексно-сопряженное Фурье-преобразование функции энергетической освещенности.

Функция распределения чувствительности в плоскости расположения фотоприемника S_m представляет собой действительную часть обратного преобразования Фурье:

$$S_m = \sum_{k=-N}^N \operatorname{Re}\left(\frac{A_k \rho_k}{\varepsilon_k^*}\right) \cos\left(\frac{2\pi mk}{2N+1}\right) + \sum_{k=-N}^N \operatorname{Im}\left(\frac{A_k \rho_k}{\varepsilon_k^*}\right) \sin\left(\frac{2\pi mk}{2N+1}\right), \quad (6)$$

где A_k — функция аподизации спектра [1].

Были исследованы трапециевидные функции аподизации спектра рис. 2 с различными соотношениями A/N . Лучшие результаты получены при $A=N/2$.

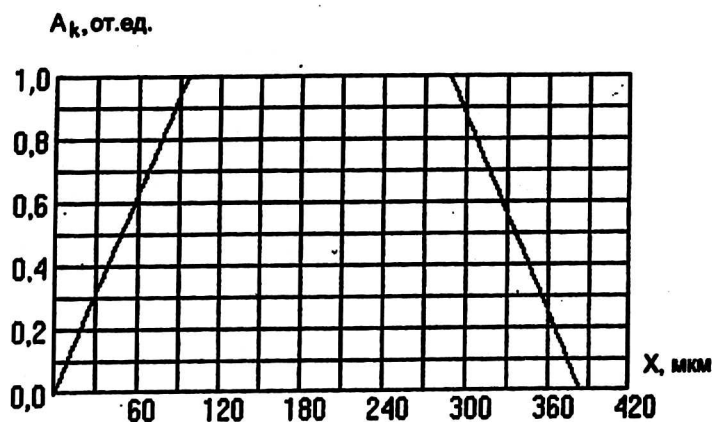


Рис. 2. Функция аподизации

На рис. 3, а, б представлены экспериментальная зависимость фотосигнала от положения оптического зонда (кривая А) и распределения фоточувствительности (кривая В) для образцов № 6-27-127 и № 34а-1.

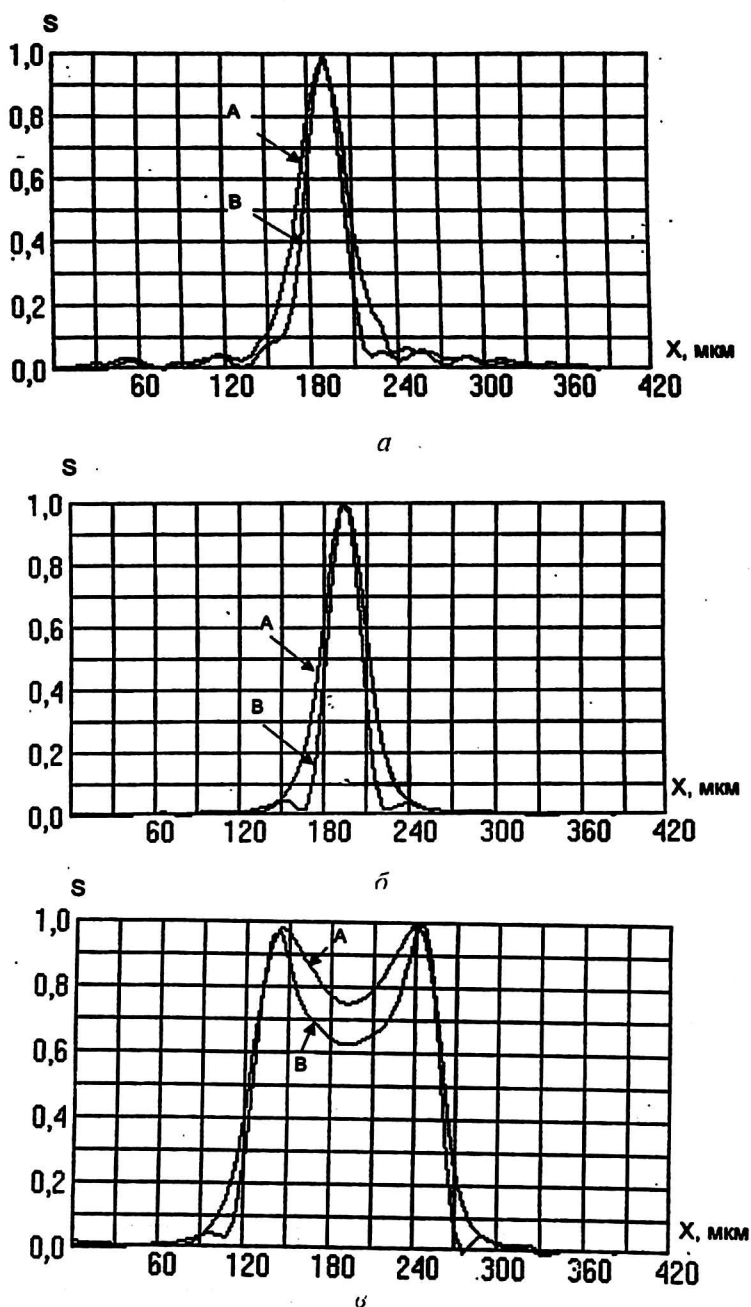


Рис. 3. Экспериментальная зависимость фотосигнала от положения оптического зонда (кривая А) и распределения фоточувствительности (кривая В):
 а — фотоприемника № 6-27-127; б — фотоприемника № 34а-1; в — фотоприемника № Н4-г

Поскольку параметр функции освещенности R_0 сильно зависит от точности юстировки измерительной установки, то производится подбор значения R_0 для

каждого измерения. Наилучшим значением R_0 считается то, при котором резкость зависимости S_m максимальна, т. е. имеется максимум функции $\sum (S_m - S_{m-1})^2$.

Ширина фотоэлектрической площадки по уровню 0,5 исходя из результатов расчета уменьшилась для образца 6-27-127 с 44 до 335 мкм, для образца 34а-1 — с 41 до 32 мкм.

Полученная после пересчета на ЭВМ ширина фотоэлектрической площадки хорошо совпадает с теоретическими оценками, проведенными для распределения фоточувствительности фотоприемника с размером p - n -перехода 20 мкм. В области p - n -перехода фоточувствительность постоянна, за пределами p - n -перехода фоточувствительность экспоненциально совпадает с характерной длиной δ —10 мкм.

Эксперименты с различными экспериментальными зависимостями фотосигнала от положения оптического зонда показали, что для улучшения сходимости процедуры вычисления величины S_m необходимо смещать начало отсчета зави-

симости $P(x)$ таким образом, чтобы $\sum_{k=-N}^{-1} P_k = \sum_{k=1}^N P_k$. В противном случае вдали

от максимума зависимости $S(x)$ появляются ложные всплески, обусловленные фазовыми ошибками дискретного преобразования Фурье, особенно сильно проявляющиеся в несимметричных зависимостях $P(x)$.

Указанные особенности вычислительной процедуры позволяют проводить восстановление зависимости $S(x)$ для фотоэлектрических площадок более сложной формы. На рис 3, в представлены экспериментальная зависимость фотосигнала от положения оптического зонда (кривая А) и распределения фоточувствительности (кривая В) фотоприемника № Н4-г для фоточувствительной площадки, имеющей два максимума. Хорошее соответствие кривых А и В подтверждает корректность вычислительной процедуры.

Разработанное программное обеспечение позволяет исследовать реальные фоточувствительные площадки ИК-фотоприемников с размерами, сравнимыми с размерами оптического зонда и длиной волны ИК-излучения.

MEASUREMENTS OF SENSITIVE ELEMENT DIMENSIONS IN FOCAL PLANE ARRAYS

K. O. Boltar, N. I. Iakovleva

The State Unitary Enterprise «RD&P Centre "Orion"», Moscow, Russia

The method of detector sensitive distribution restoring from the experimentally measured photosignal dependence and known optics spot spread function is developed and experimentally investigated.