

Structure and photoelectric properties of $Pb_{1-x}Mn_xSe$ epitaxial films

I. R. Nuriyev, M. B. Gadzhiyev, R. M. Sadigov, A. M. Nazarov
Institute of Physics of the Azerbaijan National Academy of Sciences,
Baku, Azerbaijan Republic

The features of growth, structure and photoelectric properties of $Pb_{1-x}Mn_xSe$ ($x = 0.02—0.04$) epitaxial films grown by the molecular beams condensation method in vacuum 10^{-4} Pa on BaF_2 (111) substrate have been investigated. It is shown that received films possess high photosensitivity at 77 K temperature and their spectral characteristics vary by change of x . Shift of the maximum of spectral photosensitivity to shorter wavelengths with growth of x is explained by the increase in width of the forbidden band of $Pb_{1-x}Mn_xSe$ solid solutions with increase of manganese content.

УДК 621.383

Цифровая компенсация поворота изображения в системе кругового обзора на основе матричного фотоприемного устройства

Л. И. Горелик, А. К. Петров
ФГУП «НПО «Орион»» — Государственный научный центр РФ, Москва, Россия

Одним из способов, позволяющих реализовать систему кругового обзора панорамы с минимальными массогабаритными характеристиками, является способ цифровой компенсации поворота изображения. Настоящая статья посвящена изучению этого способа в целях создания основ математической модели такой системы, в основе которой должны лежать математические закономерности, описывающие движение каждого пикселя матричного фотоприемного устройства (МФПУ) в пространстве предметов.

Система кругового обзора панорамы

Системы кругового обзора (СКО) панорамы представляют собой специализированный класс ИК-систем, решающих задачи обнаружения воздушных, надводных и наземных объектов по их собственному тепловому излучению. Отдельный подкласс представляют системы, формирующие тепловизионные изображения всей сферы и используемые для решения большинства задач сферического пояса.

Такие системы находят широкое применение в различных комплексах защиты, в частности, на самолетах гражданской авиации, а также в оптико-электронной аппаратуре охраны объектов от террористических атак, системах тепловизионного наблюдения, в навигационном оборудовании, системах робототехники и т. д.

Для ряда задач могут применяться СКО только с минимальными массогабаритными характеристиками, поэтому нахождение способов реализа-

ции таких систем — одна из приоритетных задач в современной теплопеленгации.

Способы построения СКО

Система кругового обзора панорамы, как и любая другая ИК-система, представляет собой сложный взаимосвязанный комплекс оптического тракта, фотоприемной системы, системы охлаждения и необходимой системы цифровой обработки сигнала.

При построении СКО следует выработать способ эффективного обзора пространства, возможны разные варианты его реализации. У каждого из них есть не только свои преимущества, но и недостатки. Выбор конкретного способа определяется требованиями решаемой задачи и возможностями его воплощения.

Наиболее употребляемые на практике способы обзора пространства можно условно разделить на следующие:

- *теодолитный способ*, т. е. механическое сканирование пространства всем приемным устройством (объектив+фотоприемное устройство). Эта схема построения СКО — простейшая из возможных. Ее целесообразно применять для систем дальнего действия с большим диаметром входного зрачка и значительными массогабаритными характеристиками. В этом случае помимо внушительных размеров возникает проблема сброса информации на неподвижное основание. Главное достоинство этой схемы — предельно простой оптический тракт, не содержащий ни компенсатора вращения изображения, ни сканирующих зеркал, дополнительных окон и т. д.;

- *обзор пространства с помощью оптического зеркального шарнира*. В этом случае фотоприемное устройство неподвижно (в этом его преимущество), но необходима компенсация поворота изображения. Такой способ применяется для систем на основе МФПУ с одной или несколькими длинными фоточувствительными линейками. МФПУ в обсуждаемой схеме работает в идеальных условиях на неподвижном основании, узел сброса информации не нужен. Применяемые оптические компенсаторы вращения изображения являются трудоёмкими и дорогостоящими оптико-механическими узлами прибора. Их использование значительно усложняет оптический тракт и повышает массогабаритные характеристики, кроме того, они поглощают часть входного излучения и тем самым уменьшают чувствительность системы в целом;

- *обзор пространства за счет применения однотипных оптико-электронных модулей* на основе МФПУ. К преимуществам стоит отнести отсутствие механических перемещений и сложных узлов, а к недостаткам — необходимость в большом количестве таких МФПУ (особенно для обеспечения для многих применений больших угловых размеров зоны обзора), сложную систему охлаждения;

- *формирование изображения сферического пояса за счет применения матричного фотоприемного устройства и панорамных оптических систем* типа “all sky” и “fish-eye”. Преимущество этого способа — простота конструкции прибора вследствие отсутствия движущихся частей, а с другой стороны — такие системы могут иметь малый размер входного зрачка, что определяется форматом МФПУ. В будущем, когда форматы будут приближаться к десяткам мегапикселей, такой способ может быть перспективным.

Цель настоящей работы заключается в рассмотрении возможностей создания СКО с цифровой компенсацией поворота изображения, где в отличие от второго случая не нужен оптико-меха-

нический компенсатор, что является серьезным преимуществом. Такие СКО можно создавать как за счет применения МФПУ, так и приемного тракта со специальной топологией фоточувствительного элемента: в виде кольца или концентрических колец.

Необходимо обратить внимание на то, что для этого способа для исключения смаза изображения необходимо применение матрицы, работающей в режиме “snap-shot” с временами накопления, равными экспозиции каждого элемента зоны обзора. Другим важным преимуществом такого способа является возможность формирования зон обзора с большими угловыми размерами. Это объясняется применением широкопольных линзовых оптических трактов в отличие от применяемых для второго случая зеркально-линзовых и зеркальных с зеркальным компенсатором. Использование МФПУ со стандартной топологией, в отличие от кольцевой, может позволить создать систему, работающую в двух режимах:

- режим обзора панорамы;
- остановка и наблюдение в узком поле с переходом на режим с большими временами накопления и частотой кадров до нескольких сотен герц.

Для достоверной передачи информации такой системой необходимо знать закон сканирования пространства для каждого пикселя матрицы.

Закон сканирования пространства

Рассмотрим систему сканирования пространства с одним плоским качающимся зеркалом (рис. 1).

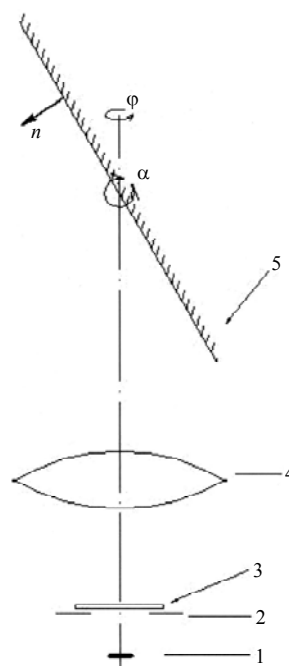


Рис. 1. Система сканирования пространства:
1 — МФПУ; 2 — холодная диафрагма; 3 — входное окно МФПУ; 4 — объектив; 5 — сканирующее зеркало

Опишем траекторию движения фоточувствительных элементов МФПУ в пространстве предметов при вращении сканирующего зеркала.

Сканирующее зеркало имеет две степени свободы: углы φ и α .

Угол α — образован плоскостью, параллельной плоскости фоточувствительных элементов матрицы, и внешней нормалью к отражающей поверхности зеркала n .

Угол φ — образован проекциями нормали n на эту плоскость в начальной и рассматриваемый моменты времени.

Непрерывное вращение зеркала вокруг вертикальной оси (соответствующее изменению угла φ) обеспечивает круговое сканирование по азимуту, а вращение вокруг горизонтальной оси (соответствующее изменению угла α) — по углу места.

Зададим внешнюю нормаль зеркала вектором, выраженным через углы α и φ , как

$$n = (-\cos\alpha \cos\varphi, -\cos\alpha \sin\varphi, -\sin\alpha).$$

Поместим начало координат в геометрический центр сканирующего зеркала, тогда для любой геометрической точки (для отдельного пикселя матрицы) в фокальной плоскости объектива с радиус-вектором r_0 закон сканирования можно записать в следующем виде:

$$r' = (l - r_0 - 2n(l - r_0, n)) / |l - r_0 - 2n(l - r_0, n)|, \quad (1)$$

где l — радиус-вектор центра объектива.

Вывод этой формулы основан на законе отражения $a' = a - 2n(a, n)$, где a' и a — векторы, направленные вдоль отраженного и падающего луча, соответственно.

Траектории движения элементов матрицы в пространстве предметов

На основании зависимостей, приведенных в формуле (1), рассмотрим траекторию движения фоточувствительных элементов матрицы.

На рис. 2, *a* приведена смоделированная траектория движения крайнего фоточувствительного элемента в пространстве предметов в проекции на плоскость для положения зеркала, соответствующего $\alpha = 45^\circ$. По оси абсцисс отложено значение угла поворота φ в радианах, а по оси ординат — угловое положение пикселя матрицы.

В случае сканирования сферического пояса значительных угловых размеров, что возможно за несколько оборотов зеркала с двумя степенями свободы, траектория движения рассматриваемого пикселя в пространстве предметов в проекции на плоскость в зависимости от количества оборотов будет иметь вид, представленный на рис. 2, *б*.

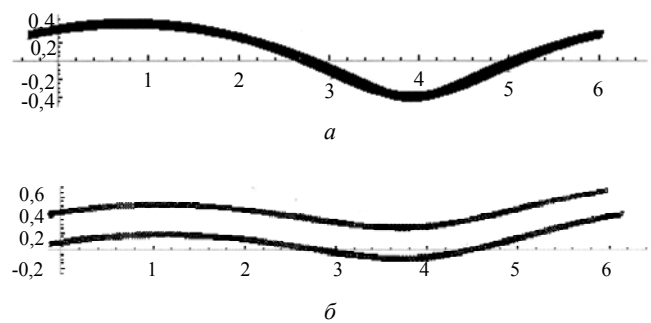


Рис. 2. Траектория движения пикселя при сканировании по: *a* — азимуту; *б* — двум направлениям

Приведенная в качестве примера на рис. 2, *б* траектория соответствует движению крайнего пикселя матрицы для случая перекрытия сферического пояса по углу места за два прохода.

Исследование скорости движения элементов матрицы в пространстве предметов

В пространстве предметов разные пиксели матрицы проходят разные расстояния за одно и то же время, поэтому каждому элементу матрицы соответствует различное время экспозиции. Чем дальше положение пикселя от центра, тем больше его скорость движения в пространстве предметов, поэтому получаемое на выходе изображение будет неоднородно по своему качеству.

Для того чтобы найти скорость движения пикселя, требуется продифференцировать функцию (1) по времени. Получившаяся в результате дифференцирования этой функции зависимость явно иллюстрирует описанный выше вывод. На рис. 3, *a* приведены примеры таких зависимостей для разных пикселей матрицы.

Рассмотрим наиболее интересный и редко реализуемый на практике случай, когда угловой размер матрицы составляет $\pi/2$. Действительно, чем больше угловой размер матрицы, тем сильнее отличаются скорости ее элементов в пространстве предметов.

На рис. 3, *a* по оси ординат отложена относительная скорость элементов, расположенных на диагонали относительно центрального элемента. Скорость последнего принята за единицу, по оси абсцисс — угол поворота зеркала в радианах. Приведены полупериоды этих функций. Из рис. 3, *a* видно, что чем ближе элемент расположен к центру матрицы, тем меньше отличается его скорость.

Для других элементов, расположенных симметрично относительно центра матрицы, при сканировании зависимость будет иметь вид, изображенный на рис. 3, *б*.

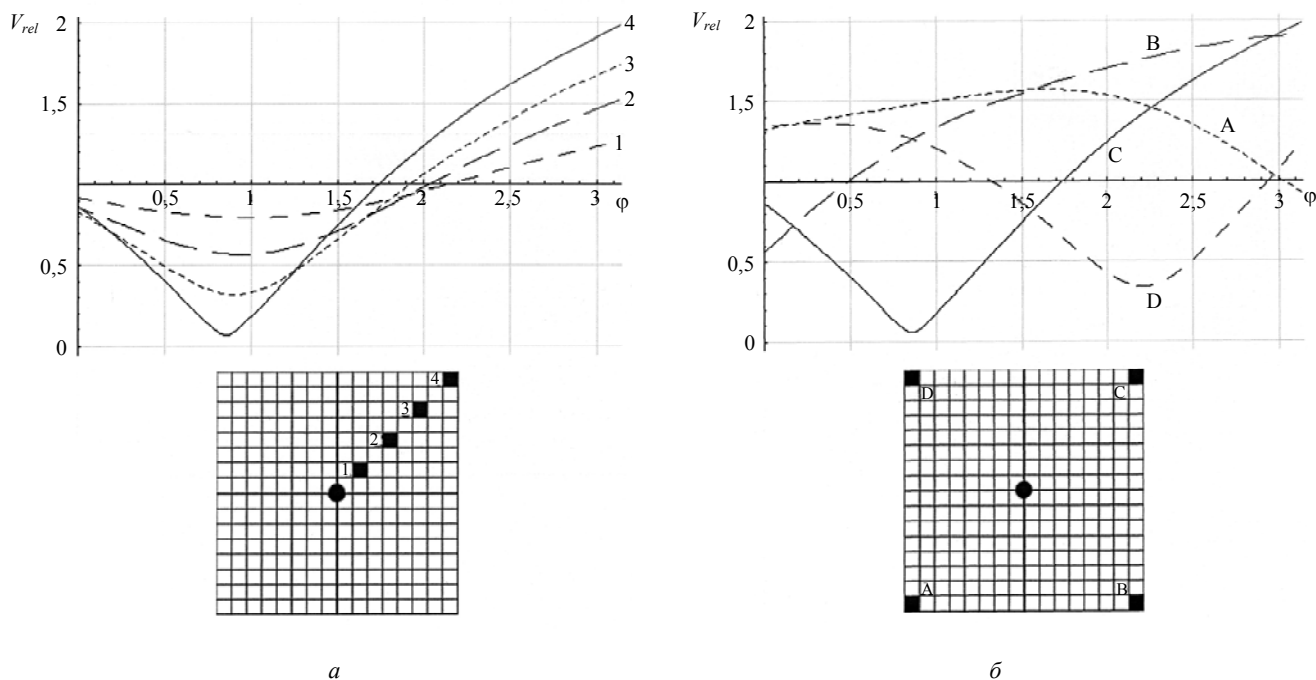


Рис. 3. Относительные изменения скорости движения пикселей МФПУ в пространстве предметов (A, B, C, D) и положение рассматриваемых пикселей на МФПУ:

a — для элементов, имеющих угловой размер матрицы, равный $\pi/2$; б — для элементов, расположенных симметрично относительно центра матрицы

Анализируя эти зависимости, приходим к выводу, что в один и тот же момент времени даже симметрично расположенные элементы матрицы могут иметь разные скорости в пространстве предметов, и, соответственно, расположение искажений на получаемом изображении будет также несимметричным.

Преимущества и недостатки малогабаритной СКО с цифровой компенсацией поворота изображения

Как видно из изложенного выше математического описания движения пикселей матрицы в СКО с цифровой компенсацией поворота изображения, применение предложенного способа построения системы обладает рядом недостатков:

- достаточно низкий коэффициент использования элементов матрицы по времени;
- различные времена экспозиции для элементов матрицы;
- потеря разрешения при значительных углах поворота матрицы.

Но вместе с тем более подробный системотехнический анализ и проработка ряда конкретных оптико-электронных приборов показали, что несмотря на изложенные выше недостатки, рассматриваемая СКО может занять свою нишу примене-

ния среди систем, работающих на малых и средних дальностях, обладающих высокими динамическими характеристиками, большими полями обзора по углу места, а также минимальными массогабаритными и стоимостными характеристиками.

В ФГУП «НПО «Орион»» разработан ряд МФПУ для спектрального диапазона 3—5 мкм, работающих в режиме "snap-shot", которые можно использовать в таких системах.

Проведенная оценка энергетического потенциала системы с $d_{in} = 30$ мм; $d_{in}/f = 1/1$; $T_{sur} = 1$ с и $\Omega = 50^\circ \times 360^\circ$ показала возможность реализации пороговой облученности на входном зрачке $\sim (5—8) \cdot 10^{-13}$ Вт/см². В качестве базового чувствительного элемента такой системы использовалось МФПУ на основе InSb со следующими основными характеристиками:

- спектральный диапазон 3—5 мкм;
- формат 256×256;
- шаг пикселя 35 мкм;
- обнаружительная способность элемента $1 \cdot 10^{11}$ Вт⁻¹·Гц^{1/2}·см.

Альтернативный вариант СКО с оптическим компенсатором поворота изображения на многорядном МФПУ формата 4×256 будет иметь примерно в два-три раза лучшую чувствительность, но значительно более сложную конструктивную реализацию, большие массогабаритные характеристики и большую стоимость.

Digital image-rotation compensation in the all-round surveillance focal plane array system

L. I. Gorelik, A. K. Petrov

Orion Research-and-Production Association, Moscow, Russia

Using digital image-rotation compensation is one of the methods allowing designing the all-round surveillance focal plane array system with minimal weight and size properties. This article is devoted to considering the discussed method with aim to develop the mathematical model of such device. The rules which describe the motion of each pixel of FPA in Snapshot mode in the object space form the basis of the model to be created.

* * *