

## Устройства микросканирования для тепловизоров диапазона 8–12 мкм на основе вращающихся пластин из Ge

И. И. Кремис, Р. А. Гладков

*Представлены результаты разработки устройств микросканирования для тепловизоров третьего поколения на основе вращения пластин из Ge на базе коллекторного электродвигателя и двигателя с внешним ротором. Приведены основные технические характеристики микросканеров, дана их сравнительная оценка. Разработан и опробован метод контроля функционирования микросканеров, позволяющий осуществлять их юстировку как на этапе производства, так и на этапе использования в составе тепловизионных каналов. По результатам расчетов, абсолютная погрешность метода составила 4 мкм, что подтверждено натурными измерениями.*

*Ключевые слова:* микросканер, пиксель, матричное фотоприемное устройство.

**Ссылка:** Кремис И. И., Гладков Р. А. // Успехи прикладной физики. 2019. Т. 7. № 4. С. 390.

**Reference:** I. I. Kremis and R. A. Gladkov, Usp. Prikl. Fiz. 7 (4), 390 (2019).

### Введение

Основным преимуществом тепловизионных каналов (ТВК) на основе смотрящих ИК-матриц перед ТВК, использующих линейчатые фотоприемники, считается их более высокая надежность по причине отсутствия сканирующих систем. По этой же причине указанные каналы обладают меньшими габаритами и энергопотреблением.

Однако изображения, получаемые с матричных фотоприемников (МФПУ), обычно демонстрируют пониженное разрешение по сравнению со сканирующими системами с аналогичным мгновенным полем. Это ограничение разрешения связано с реальным размером пикселя и выполнением пространственной синхронной выборки, характерной для

смотрящих матриц. Эффективным методом улучшения разрешения смотрящих систем является метод, называемый микросканированием [1–5]. Метод позволяет увеличить плотность выборки сцены при перемещении ее проекции на детекторе контролируемым образом [1, 5].

В настоящее время существуют различные варианты устройств микросканирования (УМС) для ТВК. Из них по способу смещения оптического хода лучей можно выделить УМС, использующие изменение наклона зеркала [1, 6], смещение светосильного компонента оптической системы [4, 7] и изменение наклона плоскопараллельной пластинки или оптического клина [9–11, 16, 17]. Для получения необходимого смещения оптического компонента существуют решения, основанные на использовании пьезоактуаторов [12–15, 18, 19], электромагнитов [8] и электродвигателя [7, 11].

Существуют также варианты сканирующих систем, где наклон зеркала осуществляется электростатическим или тепловым методами. Однако они не используются в механических системах сканирования для ТВК, поскольку первый – не позволяет создать достаточного

---

**Кремис Игорь Иванович**, зав. отделом, к.т.н.  
**Гладков Роман Александрович**, м.н.с.  
Филиал ИФП СО РАН «КТИПМ».  
Россия, 630090, г. Новосибирск, проспект Академика  
Лаврентьева, 2/1.  
E-mail: ktipm@oesd.ru; igor21738@ngs.ru

Статья поступила в редакцию 28 мая 2019 г.

© Кремис И. И., Гладков Р. А., 2019

усилия для смещения или подъема механических компонентов, если приложенное напряжение не является чрезвычайно высоким, второй – имеет низкое быстродействие и чувствителен к тепловому шуму [8]. В работе [1] рассматривается вариант использования немеханического метода, а именно, с использованием смещения лучей при прохождении через жидкокристаллические матрицы толщиной в несколько микрон, поляризованных в ортогональных направлениях. Применение данного метода ограничено по причине большого времени отклика.

В Филиале ИФП СО РАН «КТИПМ» ранее были разработаны устройства микросканирования, позволяющие смещать оптический компонент до 40 мкм при частоте переключения полей до 200 Гц, для УМС с пьезоприводом; и перемещения 120 мкм при частоте полей 100 Гц, для УМС с электромагнитным приводом [20].

Опыт практического использования данных микросканеров в тепловизионном канале [21] при отработке алгоритмов обработки изображения показал их следующие недостатки:

- отсутствие возможности оперативного, контролируемого и гибкого изменения шага смещения проекции (УМС с электромагнитным приводом);

- отсутствие возможности получения большого шага смещения проекции на высокой частоте переключения полей (УМС с электромагнитным и пьезоприводом);

- отсутствие возможности объективного контроля величины и траектории перемещения проекции в условиях текущей эксплуатации изделия (УМС с электромагнитным и пьезоприводом);

- высокий уровень сложности механизмов микросканеров и, как следствие, низкая надежность при высокой себестоимости конструкции (УМС с электромагнитным приводом).

Разработка и получение образца микросканера, лишённого указанных недостатков, позволит получить более совершенный инструмент для развития алгоритмов обработки тепловизионного изображения [21, 22] и, в совокупности с [20], определить оптимальные (в рамках доступных технологий) направления по созданию опытных образцов микросканеров, годных к применению в изделиях военной и специальной техники.

В этой связи в Филиале ИФП СО РАН «КТИПМ» была поставлена работа по созданию устройства микросканирования, удовлетворяющего следующим требованиям:

- низкая себестоимость устройства микросканирования (относительно микросканеров [20]);

- перемещение проекции изображения в диапазоне от 15 мкм (1/2 от 30 мкм – шага фотоэлементов приемника, требуется для реализации алгоритма увеличения пространственного разрешения [23]) до 150 мкм (предполагаемый максимальный размер кластера дефектов фотоприёмника [21]);

- частота переключения полей от 50 Гц до 200 Гц (максимальная кадровая частота фотоприемника [21]);

- простота и надежность методов контроля функционирования микросканера, позволяющих осуществлять его юстировку как на этапе производства, так и на этапе использования в составе ТВК.

Цель настоящей статьи – изложение результатов разработки устройства микросканирования в соответствии с обозначенными выше требованиями.

### Устройства микросканирования

Анализ систем микросканирования, используемых в тепловизионных приборах иностранного производства, показал наибольшее распространение систем, основанных на вариантах использования вращения плоскопараллельной пластинки, призмы или смещения линзы – компонента объектива. При этом смещение рабочего компонента осуществляется максимально простым способом, а именно, привод выполняется с использованием электродвигателя или пьезоэлемента.

Наиболее простой способ получения сдвига от пьезоактюатора – это непосредственное воздействие усилия от его деформации на оптический компонент. При этом в работе [20] показано максимальное смещение для микросканера в данном исполнении – 40 мкм.

В работе [15] показано, что на приводе с пьезоактюатором можно получить сдвиг до 200 мкм. В данном случае для получения больших смещений можно предположить использование системы рычагов типа Cedrat

(механический усилитель) [13, 19] и/или механически усиленный пакет пьезоактюаторов [31]. Однако это подразумевает усложнение конструкции УМС при усилении требований к технологии изготовления.

В этой связи, и исходя из обозначенных выше требований, было предложено использовать как наиболее перспективную в реализации идею вращения электродвигателем наклоненной плоскопараллельной пластинки [9]. При этом оперативность и гибкость получения требуемых смещений проекции изображения обеспечить путем создания специального механизма юстировки, позволяющего изменять величину наклона пластины произвольным образом.

Исходя из указанных соображений, в Филиале ИФП СО РАН «КТИПМ» были разработаны и изготовлены два макета устройств микросканирования, осуществляющих четырехточечную диаграмму микроперемещения (по квадрату):

- с вращающимися четырьмя пластинами из Ge с приводом на базе коллекторного электродвигателя;
- с вращающейся одиночной пластинкой из Ge с приводом на базе синхронного бесколлекторного двигателя с внешним ротором.

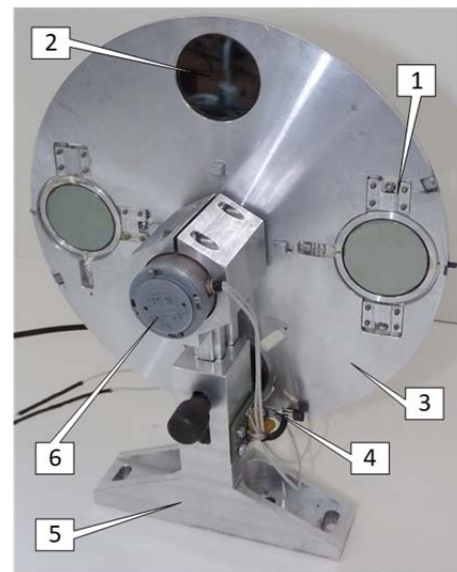
#### **Устройство микросканирования с вращающимися пластинами и приводом на базе коллекторного электродвигателя**

Микросканер состоит из четырех плоскопараллельных пластин из Ge толщиной 2 мм, расположенных в металлическом диске, который приводится в движение электродвигателем ДПМ-25-Н1-03. Для одной пластины юстировочный механизм не предусмотрен – пластина перпендикулярна направлению потока тепловой энергии, что формирует проекцию первого микроскана. Для трех пластин в посадочных местах диска предусмотрен юстировочный механизм для смещения проекции изображения сцены наблюдения в плоскости матрицы ФПУ на нужную величину, причём шаг микросканирования в каждом микроскане задается индивидуально и таким образом формируются оставшиеся три микроскана. Настройка величины шага микроскани-

рования осуществляется посредством ввинчивания винта механизма на нужное количество оборотов.

Вращение диска, синхронное с сигналом экспозиции фотоприемника, обеспечивает последовательную смену пластин в оптическом тракте канала. Тем самым выполняется регистрация сигнала сцены по четырем точкам микросканирования с заданным смещением.

На рис. 1 приведен внешний вид устройства микросканирования.



**Рис. 1. Устройство микросканирования с вращающимися пластинами: 1 – механизм юстировки пластины; 2 – пластина Ge; 3 – диск сканера; 4 – датчик холла; 5 – штатив; 6 – двигатель.**

Управление вращением диска УМС выполнено на основе ПИД-регулятора (пропорционально-интегрально-дифференцирующий регулятор) и осуществляется в соответствии с блок схемой, приведенной на рис. 2.

Объектом управления здесь является коллекторный двигатель с диском на оси ротора. На двигатель подается управляющее воздействие в виде напряжения  $U(t)$ , значение скважности которого определяет частоту вращения диска. Управляющее воздействие формируется узлом управления, в основе которого лежит ПИД-регулятор (пропорциональный, интегральный и дифференциальный регулятор [24]). Задача ПИД-регулятора – сформировать управляющее воздействие, при котором сигнал ошибки  $e(t)$  будет минимизирован. Сигнал ошибки  $e(t)$  определяется разностью между

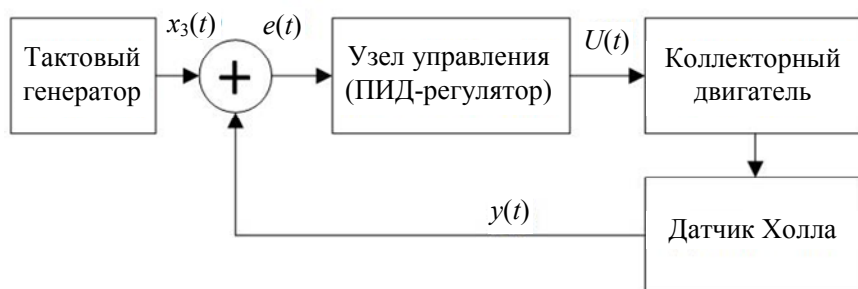


Рис. 2. Структурная схема системы управления микросканером.

задающим воздействием  $x_3(t)$  и сигналом обратной связи  $y(t)$ .

В нашем случае задающее воздействие  $x_3(t)$  – это заданное число тактов тактового генератора за один цикл вращения УМС;  $y(t)$  – сигнал обратной связи, равный числу тактов

за текущий цикл вращения диска, подается на сумматор, формируя сигнал ошибки  $e(t)$ .

В табл. 1 приведены основные параметры микросканера с вращающимися четырьмя пластинами и приводом на базе коллекторного электродвигателя.

Таблица 1

Основные параметры микросканера с приводом на базе коллекторного электродвигателя

Наименование параметра, единица измерения	Значение
Частота переключения полей, Гц	до 200
Диапазон смещения проекции изображения, мкм: по $Y$ по $X$ максимальный вписанный квадрат перемещений, мкм	от 0 до 150 от 0 до 150 150×150
Время переключения полей, мс	5 и более
Точность позиционирования, мкм	± 4
Максимальный вес оптических элементов, г	28 (4 шт. по 7 г)
Минимальное, для размещения УМС, расстояние между компонентами оптики, мм	более 5
Диаметр рабочей апертуры, мм	25 (возможны исполнения до 40)
Габариты микросканера, мм – высота (диаметр диска) – ширина – толщина (в рабочей части)	153 55 4,5
Масса микросканера, г	490
Потребляемая мощность (с блоком управления) при частоте переключений 200 Гц, Вт	4

### Устройство микросканирования с вращающейся пластиной и приводом на базе синхронного двигателя с внешним ротором

Микросканер использует одиночную вращающуюся плоскопараллельную пластинку из Ge толщиной 2 мм для смещения проекции изображения и представляет собой синхронный бесколлекторный двигатель с внешним ротором круглой формы, в центре которого расположена сквозная полость для размещения пластинки и элементов, служащих для изменения её наклона. Ротор микросканера

закреплен на подшипнике 6808RS (отечественный аналог: 1000808), что позволяет осуществлять его вращение относительно неподвижного фотоприёмника. Диаметры подшипника и пластинки рассчитаны с учетом требования на исключение эффекта виньетирования. При этом диаметр подшипника превышает диаметр пластинки на величину, достаточную для выполнения процедуры юстировки пластины.

Идея использования вращения одной пластины была выбрана из соображений наибольшей простоты получения четырехточечной диаграммы микросканирования и её

юстировки. Для осуществления вращения пластины было предложено разработать собственный электродвигатель с заданными габаритами и полостью необходимого диаметра в центре. При этом вариант разработки коллекторного двигателя не рассматривался по причине отказа от их применения в ряде изделий спецназначения.

На рис. 3 приведен внешний вид устройства микросканирования. Детали микросканера, за исключением подшипника, магнитопровода статора и крепёжных винтов, «напечатаны» с использованием 3D FDM принтера Prusa i2 из пластика ABS (акрилонитрилбутадиенстирольный сополимер).

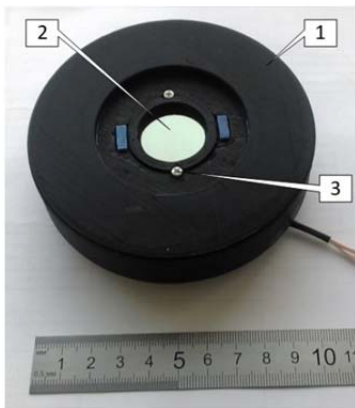


Рис. 3. Устройство микросканирования с вращающейся одиночной пластиной: 1 – ротор двигателя; 2 – пластина из Ge; 3 – винт механизма юстировки пластины.

Структурная схема управления синхронным двигателем показана на рис. 4. Здесь многофазный тактовый генератор задает воздействие  $x_3(t)$ , непосредственно подаваемое на синхронный бесколлекторный двигатель. Элемент обратной связи нужен для регистрации возможного срыва синхронизации между внешним ротором и задающим воздействием  $x_3(t)$ , определяющим частоту вращения магнитного поля в статоре. Также обратная связь позволяет осуществлять привязку требуемого угла поворота пластинки с моментом регистрации изображения.

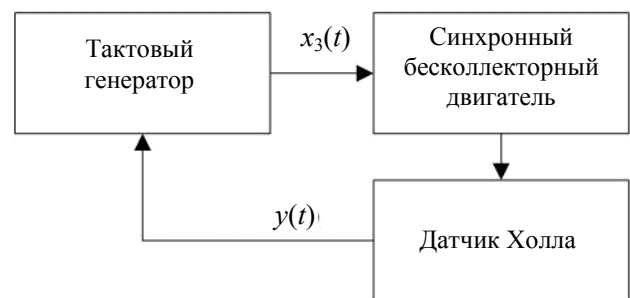


Рис. 4. Структурная схема системы управления микросканером с вращающейся одиночной пластиной.

В табл. 2 приведены основные параметры микросканера с вращающейся одиночной пластиной и приводом на базе синхронного двигателя с внешним ротором.

Таблица 2

**Основные параметры микросканера с приводом на базе синхронного двигателя с внешним ротором**

Наименование параметра, единица измерения	Значение
Частота переключения полей, Гц	до 200
Диапазон смещения проекции изображения, мкм:	
– по $Y$	от 0 до 150
– по $X$	от 0 до 150
– максимальный вписанный квадрат перемещений, мкм	до 150×150
Время переключения полей, мс	5 и более
Точность позиционирования, мкм	4
Максимальная масса оптического элемента, г	10
Минимальное, для размещения УМС, расстояние между компонентами оптики, мм	более 5
Диаметр рабочей апертуры, мм	26 (возможны исполнения до 40)
Габариты микросканера, мм	
– диаметр	103
– толщина	22
Масса микросканера, г	220
Потребляемая мощность (с блоком управления) при частоте переключений 200 Гц, Вт	6

По итогам сравнения микросканеров рис. 1 и рис. 3, можно сказать, что при сопоставимых величинах смещения проекции изображения наибольшая перспектива применения в изделиях ВВСТ просматривается для микросканера с вращающейся пластиной и приводом на базе синхронного двигателя с внешним ротором по целому ряду преимуществ: малая масса и габариты (при исполнении данного УМС из алюминиевого сплава вес изделия увеличится, но не более чем в два раза, при этом появится возможность уменьшить габариты, усиливающие пластиковый вариант конструкции); настройку требует один элемент микросканера – пластинка из Ge (ее наклон); при остановке двигателя ИК-излучение беспрепятственно проходит через пластинку микросканера; использование бесколлекторного двигателя исключает элементы коллекторных двигателей, подверженных существенному износу, т. е. щетки и коллектор (ресурс бесколлекторного двигателя ограничивается его подшипником и, по [29], для категории машины для односменной работы с неполной нагрузкой – стационарные электродвигатели, редукторы, дробилки – составляет более 12000 часов); исключение искрообразования, что важно при применении в ряде изделий спецназначения.

Для микросканера с вращающимися пластинами и приводом на базе коллекторного электродвигателя преимуществом является простота конструкции. Недостатки данного микросканера вытекают из преимуществ сканера на одной пластинке: возможная потеря изображения при остановке вращения диска; требуется юстировка четырех пластин; искрообразование в коллекторном узле двигателя при трении щеток о коллектор, соответственно, меньший ресурс двигателя – порядка 1000 часов [30].

Здесь также важно отметить, что использование системы микросканирования в ТВК не должно снижать ресурса системы в целом; при низком ресурсе сканера использование МФПУ в ТВК теряет свое определяющее преимущество – надежность канала. Известно, что для ТВК наиболее подверженным износу узлом является газокриогенная машина (ГКМ) охлаждения фотоприемника. Так, к примеру, ресурс ГКМ МСМГ-0,5В-0,5/80 КВО.0751.000-03

производства НТК «Криогенная техника» и ресурс ГКМ Ricor K508 составляет по 10000 часов [28, 32]. При этом микросканер на базе синхронного двигателя с внешним ротором имеет ресурс более 12000 часов, что на 17 % больше ресурса указанных ГКМ и является дополнительным преимуществом на его применение в тепловизионных каналах.

### Методика юстировки

Использование юстировочного механизма в микросканерах позволяет получить требуемый наклон плоскопараллельной пластинки, но при этом возникает вопрос контроля величины смещения проекции на заданную величину в ИК-диапазоне спектра излучения, невидимом глазу человека. В этой связи появляется необходимость в разработке простого метода обеспечивающего юстировку УМС в лабораторных условиях и условиях размещения УМС в приборе назначения.

В методе юстировки используется оптическая схема, представленная на рис. 5, где показаны лазер 5, прямоугольный экран 4, матрица фотоприемника 1; окно фотоприемника 2 и наклоненная под углом  $\alpha$  к главной оптической оси пластинка 3. Луч лазера направлен параллельно главной оптической оси: луч  $OB$  – падающий луч,  $OA$  – отраженный луч,  $AB$  – смещение между падающим и отраженным лучами лазера,  $b_1$  и  $b_2$  – расстояния от матрицы до входного окна фотоприемника и от пластинки до входного окна соответственно.

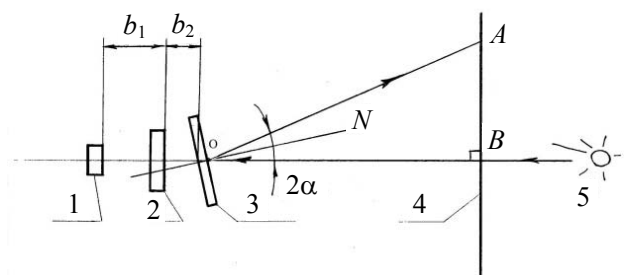
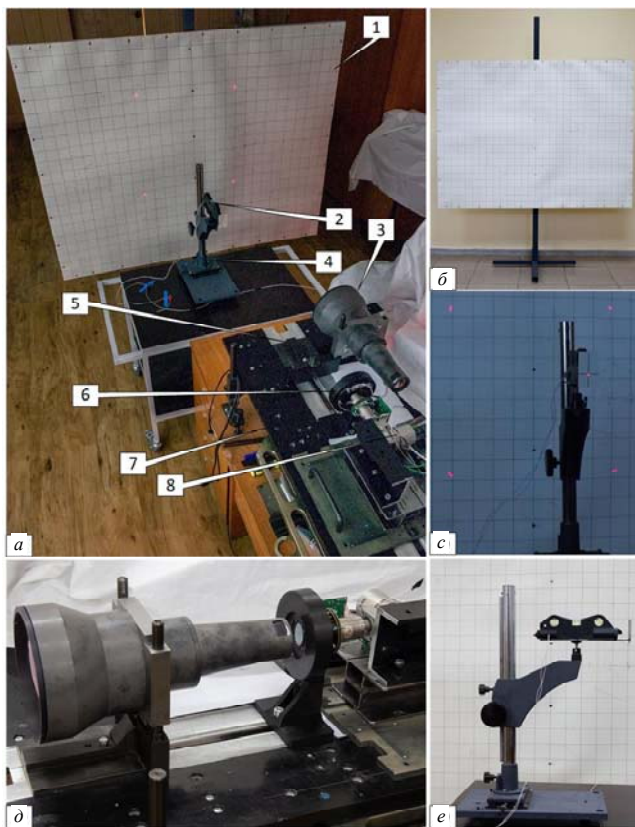


Рис. 5. Оптическая схема, описывающая метод юстировки УМС.

Метод юстировки был опробован для микросканеров с одной (см. рис. 1) и четырьмя (см. рис. 3) пластинками. Пример стенда,



реализующего метод для микросканера с одиночной пластиной и соответствующего оптической схеме рис. 5, показан на рис. 6, *а*. Здесь использованы обозначения: 1 – экран, 2 – лазерный уровень предназначен для формирования узконаправленного луча в видимом диапазоне длин волн; 3 – объектив; 4 – штатив для регулировки высоты лазера; 5 – подвижный штатив объектива для настройки фокуса; 6 – микросканер; 7 – плита-основание для размещения элементов канала; 8 – фотоприемник производства ИФП СО РАН, диапазон 8–12 мкм, формат 320×256, шаг фоточувствительных элементов 30 мкм, газокриогенная машина Ricor K508.



**Рис. 6.** Стенд для юстировки микросканера: *а* – общий вид; *б* – экран; *с* – квадрат, формируемый лучом лазера в отраженном свете; *д* – тепловизионный канал с микросканером; *е* – штатив с установленным лазерным уровнем.

На рис. 6, *б* показан штатив, предназначенный для отображения отраженного луча лазера; на рис. 6, *с* показан квадрат, формируемый лучом лазера в отраженном свете; на рис. 6, *д* показан тепловизионный канал, предназначенный для регистрации сцены при работающем микросканером в ИК-диапазоне; на рис. 6, *е* показан штатив с установленным

лазерным уровнем (используется портативный квантово-оптический генератор когерентных и монохроматических электромагнитных волн видимого диапазона в виде узконаправленного луча; состоит из красного лазерного диода, излучающего в диапазоне 635–670 нм, и коллиматора – двояковыпуклой линзы для организации узконаправленного луча [26]).

Изображения рис. 6, *а* и *с* получены в темное время суток при выключенном освещении с использованием фотоаппарата Canon EOS 6D и экспозицией в 30 секунд. Изображения рис. 6, *б*, *д* и *е* получены при включенном освещении.

Основой метода является перевод измерений из области инфракрасного диапазона спектра в видимый диапазон. Идея метода аналогична методу определения углов, используемого в приборах-гонометрах [27]. При этом метод [27] доработан тем, что, выполнив измерения положения пластинки в видимом диапазоне, дальнейшие вычисления проводятся с использованием законов геометрической оптики и параметров оптической схемы для ИК-диапазона в предположении прохождения луча лазера через пластинку. В этой связи нужно отметить необходимость учета параметра клиновидности пластинки по причине ее существенного влияния на ход лучей через пластинку и, следовательно, влияние на сдвиг проекции сцены. Также важно отметить, что при изготовлении пластинок с клиновидностью  $\rightarrow 0$  имеет место существенное увеличение трудоемкости и стоимости ее изготовления. По этой причине применение пластинок с некоторой клиновидностью существенно удешевит стоимость УМС. В этом случае выполнение корректного расчета смещения проекции потребует учета клиновидности пластинки, что будет принято во внимание при дальнейших расчетах.

Идея метода юстировки микросканера (по рис. 5) состоит в определении смещения проекции сцены в плоскости фотоприемника 1 через величину смещения  $AB$  в видимом диапазоне. Зная величину  $AB$ , можно определить угол наклона пластинки  $\alpha$  и далее, через угол  $\alpha$ , определить ход лучей и смещение проекции сцены в ИК-диапазоне

$$\alpha = \frac{1}{2} \times \arctan \left( \frac{AB}{OB} \right). \quad (1)$$

Предполагая прохождение луча лазера на рис. 5 через пластинку из Ge 3, величина смещения проекции по величине смещения лазерного луча на экране 4 рис. 5 и с учетом величины клиновидности пластинки определяется следующим образом.

На оптической схеме рис. 7 изображена пластинка с поверхностями  $G$  и  $F$  (с показателем преломления  $n_2$ ), находящихся под углом  $\varphi_1$ . Луч лазера (рис. 6,  $e$ ), из среды с показателем преломления  $n_1$  (воздух) падает на границу раздела «воздух-пластинка»  $G$  под углом  $\alpha_1$  к нормали  $N_1$  в точке  $A$ . Преломляясь под углом  $\beta_1$  к нормали  $N_1$ , луч проходит путь  $AB$ . С другой стороны, луч  $AB$  является падающим на границу раздела «пластинка-воздух»  $F$ . Луч  $AB$  падает под углом  $\alpha_2$  к нормали  $N_2$  в точке  $B$ . Преломляясь на границе раздела  $F$  под углом  $\beta_2$  к нормали  $N_2$ , луч падает на матрицу в точке  $W$ . Плоскость  $P$  – мнимая поверхность идеальной плоскопараллельной пластинки. Точкой  $Z$  отмечено место падения луча для случая совпадения плоскостей  $F$  и  $P$ .  $\theta$  – угол отклонения луча от направления в идеальной плоскопараллельной пластине;  $D$  – место падения лазерного пучка на матрицу при отсутствии пластинки.

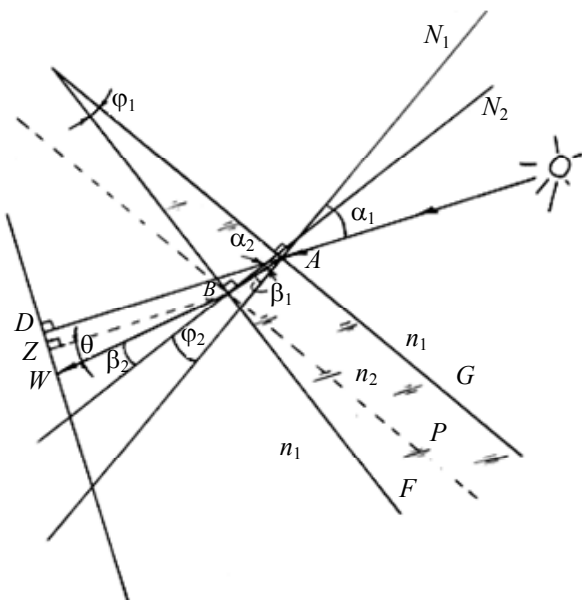


Рис. 7. Оптическая схема, описывающая прохождение ИК-луча через пластинку.

Для определения смещения необходимы следующие данные: толщина пластинки  $d$ ; расстояние от пластинки 3 до матрицы 1 (см.

рис. 5); угол клиновидности пластинки  $\varphi_1$ ; показатель преломления пластинки  $n_2$ ; угол падения сцены на пластинку. Формула для определения смещения проекции изображения  $L$  в плоскости матрицы выводится из оптической схемы рис. 7. Угол  $\varphi_2$  между нормальными  $N_1$  и  $N_2$  равен углу  $\varphi_1$ . Равенство углов очевидно. Если в точке пересечения прямых  $G$  и  $F$  построить отрезки, параллельные нормальным, то угол между отрезками также равен  $\varphi_2$ , а поскольку прямые  $G$  и  $F$  будут перпендикулярны вспомогательным отрезкам, то угол между прямыми  $G$  и  $F$  будет равен углу между вспомогательными отрезками. При этом угол клиновидности обозначим как  $\varphi = \varphi_1 = \varphi_2$ .

В общем виде можно записать соотношение:

$$L = L_1 + L_2 \tag{2}$$

где  $L_1 = DZ$  смещение, вносимое идеальной плоскопараллельной пластинкой, рассчитывается по известной формуле:

$$L_1 = d \frac{\sin(\alpha_1 - \beta_1)}{\cos(\beta_1)} \tag{3}$$

$L_2 = ZW$  – смещение, создаваемое оптическим клином с углом  $\varphi$ , рассчитывается по формуле:

$$L_2 = BZ \times \operatorname{tg} \left( \alpha_1 - \varphi + \arcsin \left( \sin(\varphi - \beta_1) \times \frac{n_2}{n_1} \right) \right), \tag{4}$$

где  $\alpha_1$  определяется по формуле (1) ( $\alpha_1 = \alpha$  из рис. 5),

$$\beta_1 = \frac{1}{2} \times \arcsin \left( \alpha_1 \times \frac{n_1}{n_2} \right), \tag{5}$$

$BZ = b_1 + b_2$  – расстояние от пластинки до плоскости матрицы.

На последнем этапе в настройке УМС на базе плоскопараллельной пластинки необходимо убедиться, что путь смещения проекции сцены формирует условный квадрат, стороны которого лежат строго вертикально и горизонтально. Для этого к схеме управления микросканером подключается ключ-транзистор, который включает диодный лазер только в



момент прохождения лазерным пучком углов квадрата. Таким образом, на экране рис. 6, *a* визуально будет виден квадрат, показанный на рис. 6, *c*, который пропорционально проецируется на матрицу приёмника со сторонами, определяемыми по формуле (2).

Для оценки точности данного метода юстировки УМС была определена абсолютная погрешность  $\Delta L$  измерения смещения проекции по смещению луча лазера на экране рис. 5.

Здесь нужно учесть, что в данном случае на значение погрешности измерения влияют различные факторы. Так, например, показатель преломления  $n_2$  германия на краях интервала длин волн ИК-диапазона принимает различные значения ( $n_2 = 4,0092 - 4,0035$ ), значит, интервал возможных значений  $L$  по (2) может колебаться. Кроме того, свойства пластинки зависят от температуры, значит, и смещение проекции является температурно зависимым. Цена деления и точность измерительных приборов также влияет на значение погрешности измерения смещения. При измерении расстояний в отражённом свете, показанных на рис. 5, абсолютная погрешность измерительного инструмента составляла  $\pm 0,5$  мм.

Ввиду того, что определение  $L$  выполнено на основании результатов прямых измерений, по выражению (2) определение  $L$  является косвенным видом измерения. В этой связи для определения погрешности метода воспользуемся формулой для расчета косвенных измерений, приведенной в [25]:

$$\Delta L = \sqrt{\sum_{i=1}^n \left( \frac{dL}{dx_i} \Delta x_i \right)^2}. \quad (6)$$

В формуле (6)  $x_i$  – параметры, определяющие значение смещения  $L$ , по каждому из которых производится дифференцирование  $L$ ;  $\Delta x_i$  – абсолютная погрешность параметра, значение которого определено прямыми измерениями. В нашем случае дифференцирование по (6) выполняется по шести параметрам, найденных путём непосредственных измерений, абсолютные погрешности которых составили:

$\Delta n_2 = 0,0017$  – значение абсолютной погрешности показателя преломления, принимается как максимальное отклонение от значения

показателя преломления, взятого из середины диапазона волн 8–12 мкм ( $n_2 = 4,0052$ );

$\Delta \varphi = 1,212 \times 10^{-6}$  рад – значение абсолютной погрешности угла клиновидности пластинки, соответствует выбранному методу определения клиновидности;

$\Delta AB = 0,0005$  м – абсолютная погрешность смещения отражённого луча на экране по рис. 5;

$\Delta OB = 0,0005$  м – абсолютная погрешность смещения расстояния от пластинки до экрана по рис. 5;

$\Delta d = 10 \times 10^{-6}$  м – абсолютная погрешность толщины плоскопараллельной пластинки, погрешность определяется возможностями производственного оборудования;

$\Delta BZ = 0,0005$  м – абсолютная погрешность в определении расстояния от пластинки до плоскости матрицы.

Вычисление погрешности косвенных измерений  $\Delta L$  метода юстировки микросканера выполнялось посредством использования математического пакета Mathcad. По результатам вычислений (6), абсолютная погрешность при определении смещения проекции составила 4 мкм. Это позволяет уверенно определять требуемую величину шага микросканирования для ТВК, использующих фотоприемники с шагом пикселя 30 мкм [20, 21, 23].

При проведении практических экспериментов по смещению проекции изображения в плоскости матрицы на 4 элемента (120 мкм) визуально подтверждалось на видеомониторе и при обработке микросканов на ПК (в тепловизионном канале по рис. 6, *d*) соответствующее смещение тестового объекта – 4 пикселя. При этом смещения проекции на величину менее или более 4 пикселей не наблюдалось, что согласуется с найденной погрешностью и подтверждает справедливость разработанной методики по настройке УМС.

Также отметим, что простота реализации методики по рис. 5 и рис. 6 позволяет осуществлять оперативный контроль смещения проекции при использовании микросканера в составе ТВК. Для этого следует предусмотреть возможность его изъятия из состава канала и размещение на основании, достаточного для исключения паразитной вибрации.

## Заключение

По результатам работы были созданы макеты устройств микросканирования, осуществляющие четырехточечную диаграмму микроперемещения – по квадрату. В микросканерах использованы простые и эффективные конструктивные решения, позволяющие обеспечить смещения проекции в плоскости матрицы – до 150 мкм – и частоту переключения полей – до 200 Гц – при низкой себестоимости изготовления изделия.

В изделиях ВВСТ наибольшая перспектива применения просматривается для микросканера с одной вращающейся пластиной и приводом на базе синхронного двигателя с внешним ротором в связи с его малой массой и габаритами, простотой в настройке и надежностью; ресурс микросканера – 12000 часов. Для микросканера с вращающимися пластинами и приводом на базе коллекторного электродвигателя основным преимуществом является простота конструкции, однако ресурс данного микросканера существенно ниже – 1000 часов.

Разработан и опробован метод контроля функционирования микросканеров, позволяющий осуществлять его юстировку как на этапе производства, так и на этапе использования в составе ТВК. Преимущества метода: простота и низкая стоимость в реализации, высокая точность измерения – абсолютная погрешность метода составила 4 мкм.

Дальнейшее развитие данной работы предполагает решение следующих задач:

- замещение металлом деталей из пластика в микросканере на одной пластинке и исследование устройств микросканирования на воздействие внешних воздействующих факторов и безотказность;
- исследование эффективности применения устройств микросканирования для увеличения пространственного разрешения ТВК;
- создание опытных образцов сканеров.

## ЛИТЕРАТУРА

1. *Wexler Howard Jay*. The Effects of Electronic Microscanning on Infrared Image Aliasing and Spatial Resolution / Thesis document, – Massachusetts Institute of Technology, 1995.
2. *O'Neil William F*. Recent Progress in Microscan Resolution Enhancement – Northrop Grumman Corpora-

tion, Electronic Systems and Sensors Sector, Baltimore, 1999.

3. *Greiner Mark E*. Resolution performance improvements in staring imaging systems using microscanning and a reticulated, selectable fill factor InSb FPA – Cincinnati Electronics Corporation, Mason, Ohio 1999.

4. *Sanders John*. Compact airborne staring FPA sensor with microscanning – FLIR Systems Inc. // Proc. of SPIE. 1996. Vol. 2743.

5. *Davis Mike*. Resolution issues in InSb focal plane array system design – Cincinnati Electronics Corporation // Proc. of SPIE. 1998. Vol. 3379.

6. *Kim Hyun Sook*. Compact MWIR camera with x20 zoom optics // Proc. of SPIE. 2001.

7. *Chevrette Paul*. Method and system for fast microscanning / US5774179A, 1998, URL: <https://patents.google.com>

8. *Mirzazadeh Ramin*. Multiphysics Simulation of Electrostatically Actuated Micromirrors in Viscous Medium – Politecnico di Milano, School of Industrial Engineering, Master of Science Thesis, 2013.

9. *Cabanski W*. Miniaturized High Performance Staring Thermal Imaging System // Proc. of SPIE. 2000.

10. *Rabault Denis*. Camera having a matrix detector equipped with a micro scanning apparatus – EP0680206A1, 1995, URL: <https://patents.google.com>

11. *Pascal Joffre*. A microscan, infrared camera equipped with such a device, and method for manufacturing this device – FR2676154A1, 1992, URL: <https://patents.google.com>

12. *Wiltse John M*. Imagery improvements in staring infrared imagers by employing subpixel microscan // Optical Engineering, 2005.

13. Piezo Microscanning Mechanism XY 25XS. URL: [www.cedrat.com](http://www.cedrat.com).

14. URL: [www.pi-china.com](http://www.pi-china.com).

15. *Meijing Gao*. Optical Microscanning X-ray Real-time Imaging System / International Conference on Mechatronics, Electronic, Industrial and Control Engineering, 2014.

16. *Clarke John Alfred*. Optical image sensing array with microscan – GB2250884A, 1990 URL: <https://patents.google.com>

17. *Guangrong Liu*. Zero point calibration method and its use in optical micro-scanning micro-thermal imaging system – CN101487809A, 2008, URL: <https://patents.google.com>

18. *Chang-woo Kem*. Micro scanning optics system for thermal image apparatus – KR20000013370A, 2001, URL: <https://patents.google.com>

19. *Wei Gene*. High-precision controllable microscanning device based on piezoelectric ceramics and sliding guide rail – CN102384787B, 2012, URL: <https://patents.google.com>

20. *Кремис И. И., Моисеев В. А., Шатунов К. П., Ульянова Е. О., Гладков Р. А., Гориков А. А.* // Успехи прикладной физики. 2017. Т. 5. № 2. С. 189.

21. *Кремис И.И., Толмачев Д. А., Гладков Р. А.* // Прикладная физика. 2017. № 1. С. 58.

22. *Жегалов С. И., Соляков В. Н.* // Успехи прикладной физика. 2014. Т. 2. № 4. С. 398.

23. *Толмачев Д. А.* / Тезисы конференции по актуальным проблемам полупроводниковой фотоэлектроники: ФОТОНИКА 2017. С 83.

24. Кутрубас В. А., Сычева Е. Е. // Промышленные АСУ и контроллеры. 2013. № 5. С. 60.
25. Тартаковский Д. Ф. Метрология, стандартизация и технические средства измерения. – М.: «Высшая школа», 2001.
26. Светцов В. И. Оптическая квантовая электроника: Учебное пособие. – Иваново, 2004.
27. Загубский А. А. Спектральные приборы: Учебное пособие. – СПб., 2007.
28. URL: <http://www.cryontk.ru>.
29. Подшипники качения: Справочник-каталог/ Под ред. В. Н. Нарышкина. –1984.
30. URL: <https://www.eandc.ru>.
31. URL: <https://www.cedrat-technologies.com>.
32. URL: <http://www.ricor.com>.

PACS: 42.30.Va

## Microscanning device for the range 8–12 $\mu\text{m}$ based on the rotation plates from Ge

I. I. Kremis and R. A. Gladkov

Novosibirsk Branch of the Institute of Semiconductor Physics of the Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences «Technological Design Institute of Applied Microelectronics» (NB ISP SB RAS TDIAM)

2/1 Academician Lavrent'ev Ave., Novosibirsk, 630090, Russia

Received May 28, 2019

***The results of the development of micro-scanning devices for thermal imagers of the third generation on the basis of rotating plates from Ge based on a collector motor and an engine with an external rotor are presented. The main technical characteristics of microscanners are given, their comparative assessment is given. Developed and tested a method of monitoring operation of microcameras, allowing for its adjustment, as at the production stage and on stage use in thermal imaging channels. According to the results of calculations, the absolute error of the method was 4 microns, which is confirmed by full-scale measurements.***

*Keywords:* micro scanner, pixel, matrix photodetector.

### REFERENCES

- Howard Jay Wexler, *Thesis document*, (1995).
- William F. O'Neil, *Electronic Systems and Sensors Sector*, (1999).
- Mark E. Greiner, *Cincinnati Electronics Corporation*, (1999).
- John Sanders, *Proc. of SPIE Vol. 2743*, (1996).
- Mike Davis, *Proc. of SPIE Vol. 3379*, (1998).
- Hyun Sook Kim, *Proc. of SPIE*, (2001).
- Paul Chevrette, *Patent US5774179A*, (1998).
- Ramin Mirzazadeh, / *School of Industrial Engineering, Master of Science Thesis*, (2013).
- W. Cabanski, *Proc. of SPIE*, (2000).
- Denis Rabault, *Patent EP0680206A1*, (1995).
- Joffre Pascal, *Patent FR2676154A1*, (1992).
- John M. Wiltse. *Optical Engineering*, (2005).
- Piezo Microscanning Mechanism XY 25XS*. [www.cedrat.com](http://www.cedrat.com)
- [www.pi-china.com](http://www.pi-china.com)
- Gao Meijing, in *Proc. International Conference on Mechatronics, Electronic, Industrial and Control Engineering*, (2014).
- John Alfred Clarke. *Patent GB2250884A*, (1990).
- Liu Guangrong. *Patent CN101487809A*, (2008).
- Kem Chang-woo. *Patent KR20000013370A*, (2001).
- Gene Wei. *Patent CN102384787B*, (2012).
- I. I. Kremis, V. A. Miseev, K. P. Shatunov, et al., *Usp. Prikl. Fiz.* **5** (2), 189 (2017).
- I. I. Kremis, D. A. Tolmachev, and R. A. Gladkov, *Prikl. Fiz.*, No. 1, 58 (2017).
- S. I. Zhegalov and V. N. Solyakov, *Usp. Prikl. Fiz.* **2** (4), 398 (2014).
- D. A. Tolmachev, *Fotonika conference abstracts*, (2017).
- M. A. Kutrubas and E. E. Sycheva, *Prom. ASU i Kontrollery*, No. 5, 60 (2013).
- D. F. Tartakovskiy, *Metrolog., Standarty*, (Moscow, Vyssh. Shkola, 2001) [in Russian].
- V. I. Svetcov, *Optich. Kvant. Elektronika* (Ivanovo, 2004) [in Russian].
- A. A. Zagubskiy, *Spectral. Pribory*, (SPb, 2007) [in Russian].
- [www.cryontk.ru](http://www.cryontk.ru)
- Podshipniki Kacheniya*. Ed. by V. N. Narishkin, (1984) [in Russian].
- [www.eandc.ru](http://www.eandc.ru)
- [www.cedrat-technologies.com](http://www.cedrat-technologies.com)
- [www.ricor.com](http://www.ricor.com).