

Multichannel image processing system for thermal supervision systems

A. A. Zorin, I. I. Razumova, V. A. Tarkov
Siberian Research Institute of Optical Systems, Novosibirsk, Russia

In this work are considered foundation principles of multichannel real-time information processing system, which is solving a problem of automatic object tracking. Image processing algorithms, which are used for three-channel system foundation and optimally approaching for system core — Microprocessor Neuro Matrix NM6403 are realized. Information processing is accomplished with using of Hopfield neural network, one 384x288 frame processing time is about 100—140 ms.

УДК 535.247.049.7: 621.383.52

Тепловизионный микроскоп

В. М. Базовкин, А. А. Гузев, А. П. Ковчавцев, Г. Л. Курышев,
А. С. Ларшин, В. Г. Половинкин

Институт физики полупроводников СО РАН, г. Новосибирск, Россия

Рассмотрены конструкция, технические параметры и примеры применения тепловизионного микроскопа. Прибор разработан на основе гибридной микросхемы матричного фотоприемного устройства InAs 128×128, шаг элементов 50 мкм, рабочий диапазон длин волн 2,5—3,1 мкм. При использовании объектива с относительным отверстием 1:1,8 и 10-кратном оптическом увеличении пространственное разрешение составило 7 мкм. Достигнутое температурное разрешение составило 0,2 и 0,015 К для объектов, имеющих температуру 300 и 450 К. Проверена возможность улучшения пространственного разрешения с помощью численной обработки изображения.

Развитие тепловизионной микроскопии расширяет возможности и области применения как обычной микроскопии видимого диапазона, так и тепловидения. Цель настоящей работы — показать возможность создания тепловизионного микроскопа на базе разработанного и изготовляемого в ИФП СО РАН матричного фотоприемного устройства InAs 128×128 [1].

В работе проведены измерения сигнальных и шумовых характеристик прибора и определены его основные параметры: температурное и пространственное разрешения. Показана возможность улучшения пространственного разрешения с помощью математической обработки. Показаны примеры применения микроскопа для контроля качества сборки, наблюдения ИК-излучения при лавинном пробое барьера Шотки на GaAs.

Особенность оптической схемы тепловизионного микроскопа

Тепловизионный микроскоп имеет особенности, отличающие его как от тепловизора, так и от микроскопа видимого диапазона.

В тепловизоре объектив расположен на близком ($\sim F$) расстоянии от фотоприемной матрицы, а объект находится на значительном ($\geq 10 F$) расстоянии от объектива. В этом случае на матрице формируется уменьшенное изображение объекта. Входное окно криостата сконструировано так, чтобы поле зрения фотоприемной матрицы захватывало выходной зрачок объектива. В микроскопе объектив расположен на близком ($\sim F$) расстоянии от объекта и на заметно большем ($5\text{--}10 F$) расстоянии от матрицы. Это обеспечивает формирование увеличенного изображения объекта на матрице. Но в этом случае объектив занимает малую часть поля зрения фо-

топриемной матрицы, что приводит к двум существенным моментам:

- значительно уменьшается интенсивность светового потока от объекта по сравнению с обычным вариантом формирования термограммы объекта с помощью тепловизионной камеры;
- незанятое объективом поле зрения фотоприемника является источником избыточного фонового излучения.

Для микроскопа видимого диапазона достаточно экранировать избыточное поле зрения темным тубусом. Для чувствительного к комнатному тепловому излучению ИК-микроскопа такой тубус будет источником дополнительного фонового излучения. Очевидно, что избыточное фоковое излучение приводит к уменьшению динамического диапазона и температурного разрешения приемника (и прибора в целом).

В используемом варианте криостата поле зрения приемника ограничено холодной диафрагмой с квадратным отверстием. Ограниченный только диафрагмой угол зрения элементов приемника составляет в среднем 0,314 ср (стерео радиан). А телесный угол объектива составляет $\sim 0,025\text{--}0,006$ ср для расстояний от матрицы до объектива $L = 5\text{--}10 F$ (коэффициент оптического увеличения $K = L/F - 1 = 4\text{--}9$).

Радикальное решение проблемы избыточного фонового излучения — создание охлаждаемого тубуса. Но такой путь приводит к неоправданно большим размерам охлаждаемой части прибора. Для данного прибора предложено более простое решение — экранирование фонового излучения зеркальным экраном. При этом собственное излучение экрана будет мало вследствие малого коэффициента теплового излучения зеркальной поверхности. Этот эффект известен и широко используется, например, при изготовлении сосудов дьюара. Коэффициент теплового излучения полированного алюминия при $T = 300$ К и $\lambda = 3$ мкм составляет 0,025 [2]. Следовательно экранировка всего поля зрения приемника мо-

жет уменьшить фоновое излучение ~ 40 раз, что эквивалентно уменьшению телесного угла до $\sim 0,009$ ср, т. е. до величины, сравнимой с телесным углом объектива.

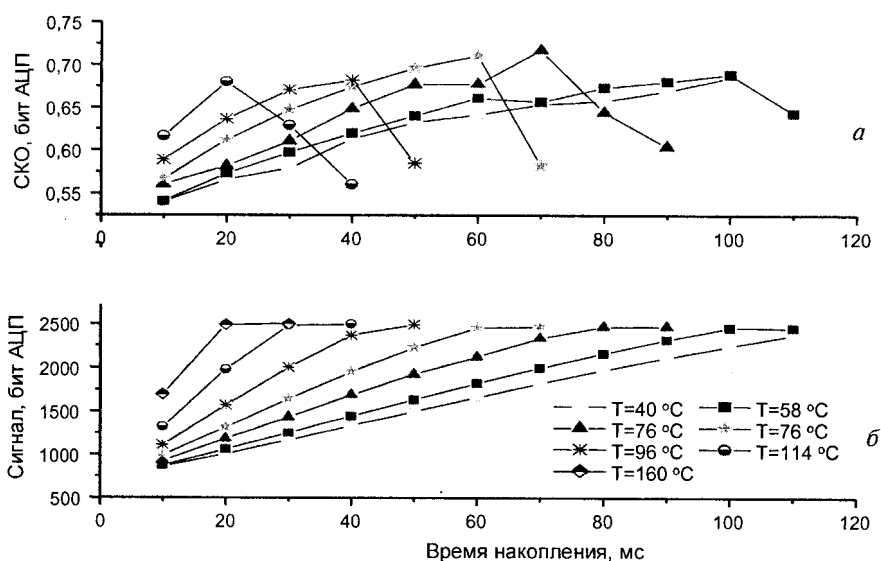
При реализации такого способа уменьшения фонового излучения следует учитывать, что холодная диафрагма, экранирующая матрицу, сама не излучает, но частично отражает попадающие на нее лучи. Для уменьшения влияния таких отраженных лучей предлагается использовать экран в форме сферического зеркала. Размеры и положение такого зеркала выбираются так, чтобы матрица "видела" в зеркале только "себя", т. е. на матрицу через зеркало должны попадать только те лучи, которые испущены самой матрицей.

На основе проведенных расчетов была разработана и изготовлена конструкция оптико-механической части микроскопа. Измерения показали эффективность предложенного способа экранирования фонового излучения. Его интенсивность уменьшилась ~ 15 раз. Для реализации полученного преимущества слабого фона были проведены дополнительные доработки схемы управления фотоприемной матрицы, контролера связи и программного обеспечения, позволившие программно изменять время накопления матрицы.

Определение температурного разрешения

Для определения абсолютных значений температурного разрешения прибора были проведены измерения сигнала и шума в зависимости от времени накопления и температуры источника. В качестве источника использовался специально сконструированный имитатор черного тела (АЧТ). Результаты таких измерений приведены на рис. 1.

Рис. 1. Зависимости шума (а) и сигнала (б) от времени накопления для различных температур объекта



Из этих данных видно, что за счет уменьшения фонового излучения удалось увеличить время накопления до 10 раз. При этом сигнал увеличился в 9 раз, а отношение сигнал—шум в ~8 раз. Большие значения времени накопления приводят к насыщению приемника остаточным фоновым излучением, источником которого, как нам кажется, является окно криостата. Полученные зависимости были аппроксимированы функцией $I(T) = I_0 + I_1 \exp(T_g/T)$, где I_0 , I_1 и T_g — подгоночные параметры. Эквивалентная шуму разность температур δT_{ne} определялась из уравнения: $I(T + \delta T_{ne}) = I(T) + \sigma$, где σ — СКО сигнала.

На рис. 2 представлены зависимости эквивалентной шуму разности температур от времени накопления для разных температур объекта. Как видно из графика температурная чувствительность улучшается с увеличением времени накопления и температуры. При восьмикратном увеличении времени накопления и температуре объекта 300 К достигается температурная чувствительность 0,2 К. С увеличением температуры объекта температурная чувствительность улучшается и достигает 0,015 К при $T = 450$ К.

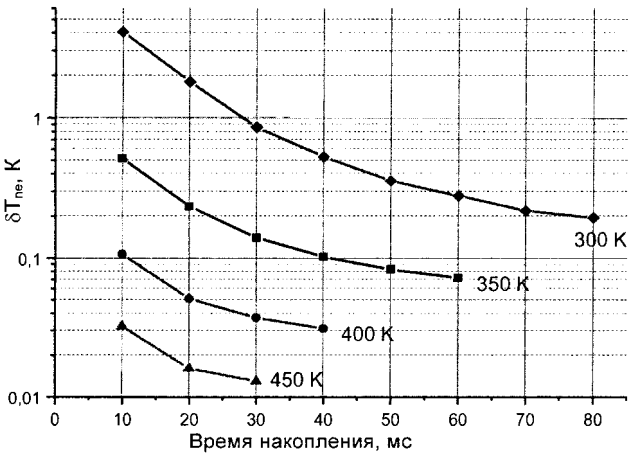


Рис. 2. Температурная чувствительность в зависимости от времени накопления для разных температур объекта

На рис. 3 представлены зависимости квадрата шума от сигнала. Хорошо видна примерно линейная зависимость на начальном участке. Известно (см., например, [3]), что при равномерном темпе генерации носителей заряда в ОПЗ полупроводника флуктуация накопленного заряда должна быть пропорциональна корню квадратному из накопленного заряда: $\sigma = k\sqrt{N}$, где k — коэффициент преобразования (передачи) количества электронов в выходной сигнал: $S = kN$.

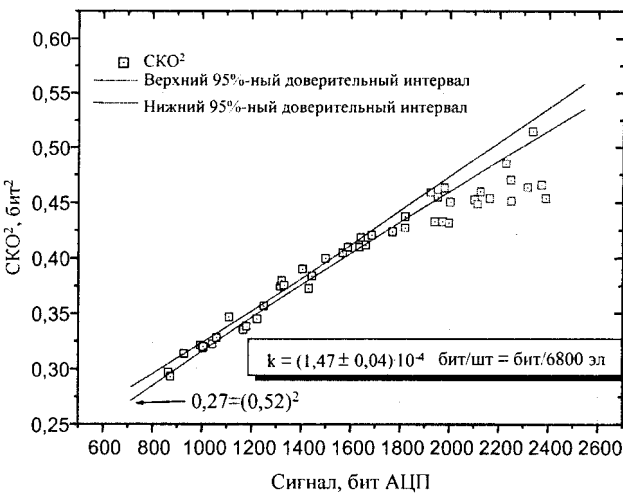
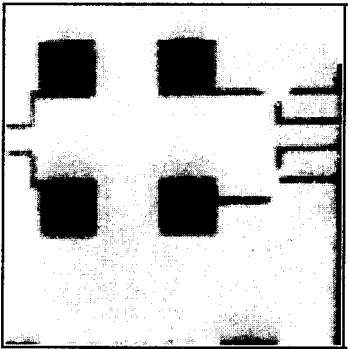
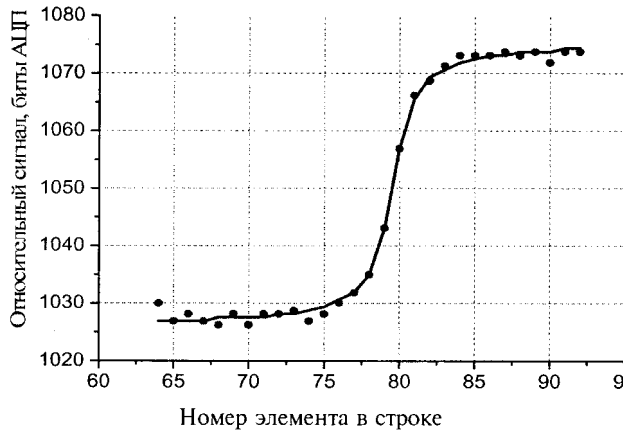


Рис. 3. Зависимость квадрата шума от сигнала и аппроксимация начального участка линейной зависимостью

Следовательно, $\sigma^2 = k^2 N = kS$. Таким образом, коэффициент линейной зависимости, определяемый из рис. 4, описывает коэффициент преобразования количества накопленных носителей заряда в биты АЦП.



а



б

Рис. 4. Определение пространственного разрешения: а — исходное изображение тестового МДП-транзистора на кристалле кремниевого мультиплексора; б — зависимости сигнала от номера элемента вблизи от края контактной площадки, исходная и аппроксимация

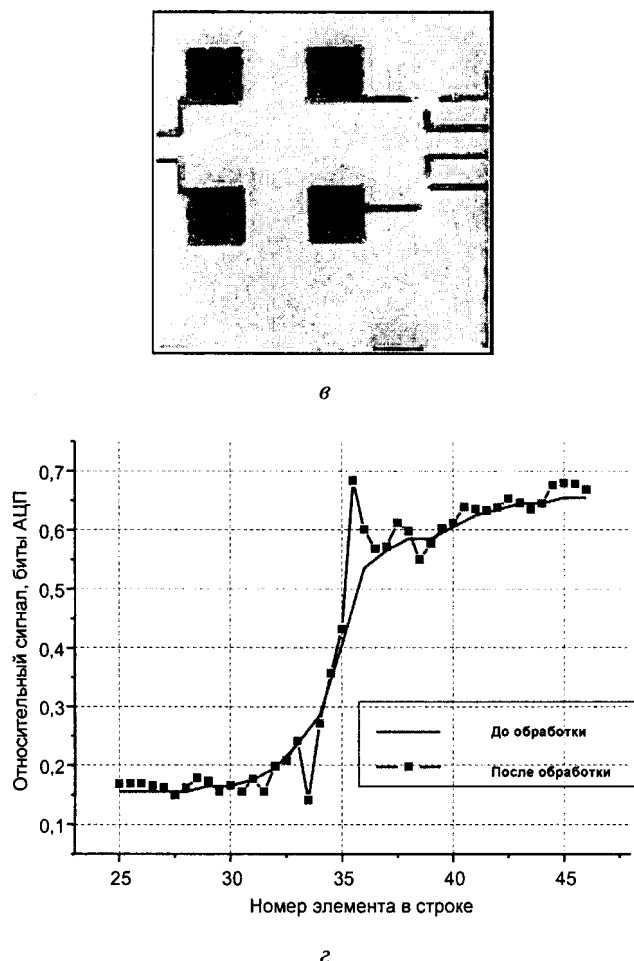


Рис. 4. Окончание. *а* — результат обработки изображения *а*; *б* — зависимости сигнала от номера элемента вблизи от края контактной площадки, исходная и результат математической обработки

Определение пространственного разрешения микроскопа

Для формирования изображения объекта в тепловизионном микроскопе был использован инфракрасный линзовый объектив (разработка и изготовление КТИПМ СО РАН г. Новосибирск). Оптические линзы просветлены напылением диэлектрических пленок на максимальное пропускание линз в диапазоне 2,5—3 мкм. Фокусное расстояние 20,5 мм, относительное отверстие 1:1,8. Теоретический (дифракционный) предел разрешения определяется выражением $\delta = 0,51 \lambda/A$, где $A = n \cdot \sin(\alpha)$ — числовая апертура объектива, n — показатель преломления среды [4]. Для используемого объектива $A \approx 0,55$ и дифракционный предел разрешения для нашего диапазона длин волн составляет $\approx 3,0$ мкм.

Для определения реального пространственного разрешения удобно использовать объект, имеющий контрастный пространственный рисунок с известными геометрическими размерами. В качестве такого тестового объекта мы использовали кристалл кремниевого мультиплексора,

входящего в состав ФПУ. На рис. 4, *а* представлен фрагмент кристалла, содержащий тестовый МДП-транзистор. Размер контактных площадок 100×100 мкм. По определению [4] объекты считаются различимыми, если перепад интенсивности между ними $\geq 4\%$. Аппроксимируем зависимость сигнала от номера элемента вблизи от края контактной площадки функцией $I(x) = I_0 + I_1 \arctg((x - x_0)/d)$. Эта функция описывает распределение интенсивности вблизи края полубесконечной полосы. Форму сигнала для полосы конечной ширины можно сформировать из сигналов двух полубесконечных (положительной и отрицательной) полос, сдвинутых на конечное расстояние. В пределе тонкой полосы получим форму сигнала $I_{th}(x)$, пропорциональную производной от $I(x)$: $I_{th}(x) \sim I_1/(1 + (x/d)^2)$. Простой расчет показывает, что две такие полосы будут различимы (по критерию 4 %) на расстоянии $\delta = 1,12 d$. В результате обработки изображения тестового объекта, представленного на рис. 4, было получено значение $\delta = 7,1$ мкм.

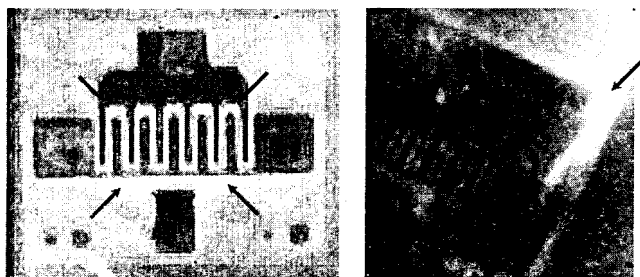
Мы проверили возможность улучшения пространственного разрешения применением численной обработки изображения. На рис. 4, *б* показано, что при отношении сигнал/шум > 20 можно улучшить пространственное разрешение примерно в два раза, т. е. до величины ~ 3 —4 мкм. Изображение обрабатывалось с помощью алгоритма, использующего представление обратной свертки изображения в виде ряда производных. Длина ряда определяется отношением сигнал/шум. В нашем случае ряд ограничивался членами из производных второго порядка.

Примеры применения микроскопа

- В качестве одного из первых объектов для наблюдения использовался изготавливаемый в ИФП СО РАН мощный сверхвысокочастотный полевой транзистор на основе n -GaAs с барьером Шоттки в качестве затвора. При включении затвора транзистора в режим лавинного пробоя было замечено видимое излучение, исходящее из областей вблизи затвора. При наблюдении такого транзистора в ИК-микроскопе (рис. 5, *а*) было обнаружено ИК-излучение, имеющее нетепловую природу. Времена включения и выключения были меньше используемой частоты кадров (25 Гц), в то время как тепловой след релаксировал десятки секунд. Кроме того, наиболее интенсивный выход излучения наблюдался из торца кристалла с транзистором, что также подтверждает нетепловой характер излучения.

Были проведены дополнительные исследования спектра излучения с помощью Фурье-спектрометра Bruker IFS-113v. Полученные результаты опубликованы в работе [5]. Анализ результатов позволил предположить, что это наблюдаемое излучение связано с переходами носителей в

валентной зоне GaAs. В литературе достаточно хорошо описан вклад переходов носителей в валентной зоне в спектры поглощения в дырочных полупроводниках. Нам не известны работы, в которых бы сообщалось о возникновении ИК-излучения при таких переходах.



а

б

Рис. 5. Полевой транзистор с барьером Шоттки на GaAs в режиме лавинного пробоя затвора:

а — ИК-излучение в области затвора; б — излучение, выходящее из торца кристалла. Предположительно излучение обусловлено переходами носителей в валентной зоне

• Другое возможное применение прибора — контроль качества гибридных сборок. Многоэлементные фотоприемные устройства линейчатого или матричного типа выполняются, в основном, в виде гибридных сборок кремниевого кристалла мультиплексора и собственно фоточувствительных линейки или матрицы. Сборка производится методом флип-чип с помощью специализированных установок. Непосредственная проверка качества такой сборки затруднена вследствие непрозрачности составных частей. Использование ИК-микроскопа позволяет решить эту проблему, так как кремний прозрачен в рабочем диапазоне длин волн микроскопа (2,5–3,1 мкм). Необходимое условие — обратная (непланарная) сторона кремниевого кристалла должна быть полированной.

На рис. 6 представлены изображения четырех углов специализированной гибридной сборки — спектрометрического модуля 1х384, более подробно описанного в [6]. Расстояние между кадрами по горизонтали 10 мм, по вертикали — 5 мм. Четыре угла одной сборки показывают различие в степени совмещения контактных площадок и различную степень деформации индиевых столбов: расстояние по горизонтали 10 мм, по вертикали 1 мм. В левом нижнем углу хорошо видны расхождение контактных площадок мультиплексора и линейки (шаг элементов мультиплексора — 50 мкм) и практическое от-

сутствие деформации индиевых столбов. В то время как в правом верхнем углу хорошо видна их деформация.

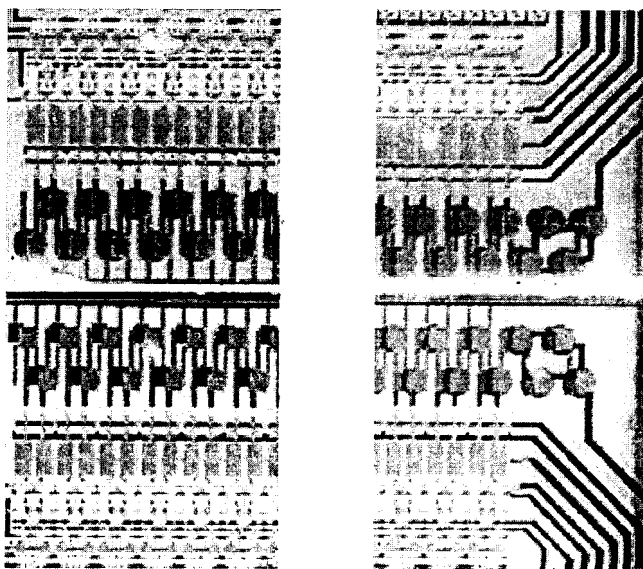


Рис. 6. Контроль качества сборки гибридной интегральной микросхемы линейчатого ИК ФПУ 1х384.

Вид через кремниевый кристалл

Заключение

Разработана конструкция и изготовлен лабораторный вариант тепловизионного микроскопа.

При 10-кратном оптическом увеличении пространственное разрешение составило 7 мкм. Показано, что разрешение можно улучшить примерно в 2 раза с помощью математической обработки.

Достижимое температурное разрешение зависит от температуры объекта и составляет 0,2 К при $T = 300$ К и 0,015 К при $T = 450$ К.

Литература

1. Овсяк В. Н., Курышев Г. Л., Сидоров Ю. Г. и др. Матричные фотоприемные устройства инфракрасного диапазона. — Новосибирск: Наука, 2001. С. 10–118
2. Физические величины: Справочник/ Под ред. Григорьева И. С., Мейлихова Е. З. — М.: Энергоатомиздат, 1991.
3. Рогальский А. Инфракрасные детекторы. — Новосибирск: Наука, 2003.
4. Микроскопы/Под ред. Полякова Н. И. — Л.: Машиностроение, 1969.
5. Zhuravlev K. S., Kolosov V. A., Milekhin A. G., Polovinkin V. G., Shamirzaev T. S.// Sem. Sci. and Technol. 2004. V. 19. № 4. S. 94.
6. Базовкин В. М., Валишева Н. А., Гузев А. А., Ефимов В. М., Ковчавцев А. П., Курышев Г. Л., Ли И. И., Строганов А. С.// Прикладная физика, 2003. № 6. С. 85.

Статья поступила в редакцию 10 октября 2004 г.

Thermal imaging microscope

V. M. Bazovkin, A. A. Guzev, A. P. Kovchavtsev, G. L. Kuryshchev,
A. S. Larshin, V. G. Polovinkin

Institute of Semiconductor Physics, Novosibirsk, Russia

The construction, technical parameters and examples of application thermal imaging microscope are considered. The device designed on the basis of a hybrid microcircuit of matrix photodetector device InAs. Dimensionality of a photodetector matrix is 128×128 , a step of cells (sensors) $50 \mu\text{m}$, a working range of lengths of waves $2.5\text{--}3.1 \mu\text{m}$. At use of an IR objective with a relative aperture 1:1.8 and $10\times$ optical magnification is received the temperature resolution 0.2 and 0.015 K for the objects having temperature 300 and 450 K, accordingly. The spatial resolution of the device in these conditions has made $\sim 7 \mu\text{m}$ at the diffraction resolution limit $2.5\text{--}3.0 \mu\text{m}$. The possibility of improvement of the spatial resolution by means of numerical processing the image is tested.

УДК 537.311.33:621.384.3

Современные тенденции в промышленной технологии изготовления полимерных оптических элементов для приборов ночного видения

А. И. Гоев, Н. А. Князева, В. В. Потелов, Б. Н. Сеник

ОАО "Красногорский завод им. С. А. Зверева", г. Красногорск, Московская обл., Россия

Рассмотрен комплексный подход к созданию промышленной технологии изготовления полимерных оптических элементов; представлена информация по оптическим полимерным материалам, термопластавтоматам, возможности системы Moldflow (фирма АБ "Универсал") в плане математического моделирования технологического процесса литья под давлением и изготовления пресс-форм.

В последние годы оптические полимерные элементы (ОЭП) с учетом высокого качества и низкой себестоимости их изготовления, многофункциональности находят все более широкое применение в оптических системах приборов различного назначения. Усилиями производителей оптических полимерных материалов (полистиролы — ПС, полиметилметакрилаты — ПММА, поликарбонаты — ПК, термопластавтоматы, в частности, немецких фирм ARBURG, BATTENFELD, DEMAG), конструкторов, программистов, технологов научных организаций и предприятий созданы все условия для изготовления оптических полимерных элементов средней точности ($N \leq 5$, $\Delta N \leq 0,5$).

Наиболее широкое применение они находят в оптических системах визирных каналов и объективов фотоаппаратов и видеокамер, дневных и ночных наблюдательных приборов и т. д. Очень перспективно их использование в оптоэлектронике, при изготовлении светодиодов с учетом резковозрастающей потребности в них.

К преимуществам полимерной оптики можно отнести: изготовление оптических элементов сложной формы с несколькими рабочими поверхностями, в том числе и асферическими; использование при изготовлении оптических элементов технологий массового производства; одновременное изготовление оптических поверхностей и элементов конструкции, а также малый вес.

Недостатками являются: повышенный коэффициент термического расширения; большой температурный коэффициент показателя преломления; низкая устойчивость к воздействию окружающей среды; старение.

В настоящее время все более широко применяется изготовление оптических элементов (ОЭ) из полимерных материалов, обладающих уникальными свойствами, в частности, с заданными спектральными свойствами по аналогии с цветными оптическими стеклами.