

## СИНТЕЗ ОПТОЭЛЕКТРОННОЙ СИСТЕМЫ УСТАНОВКИ КОНТРОЛЯ МИКРОЭЛЕКТРОННЫХ СТРУКТУР

ТРАПАШКО Г. А.

Научно-производственное республиканское унитарное предприятие «КБТЭМ-ОМО»,  
Минск, Республика Беларусь  
E-mail: tga@kbtem-omo.by

## SYNTHESIS OF OPTOELECTRONIC SYSTEM FOR CONTROL OF MICROELECTRONIC STRUCTURES

TRAPASHKO G. A.

Scientific Production Republican Unitary Enterprise «KBTEM-OMO», Minsk, Republic of Belarus

Совершенствование оборудования для контроля размеров и формы микроэлектронных структур на соответствие проектным данным и отсутствие привнесенных в него дефектов и загрязнений требует развития оптоэлектронных систем регистрации изображений структурных элементов. Синтез этих систем можно осуществлять с помощью метода, позволяющего установить обоснованность использования в ней источника излучения и определить основные функциональные параметры оптоэлектронной системы. Приведены результаты использования метода при разработке оптоэлектронной системы, работающей с разрешением 250 нм. Показано, что в контрольном оборудовании можно применять светодиоды вместо традиционно используемых галогенных и ртутно-ксеноновых ламп.

**Ключевые слова:** микроэлектроника, оптоэлектронная система, видеокамера, светодиод.

Ил. 1. Библиогр.: 8 назв.

Development of optoelectronic systems for registration of structuring element images demands improvement of the equipment for control of sizes and a form of microelectronic structures in accordance with design data and absence of introduced defects and impurities. For synthesis of these systems it is necessary to use a special method which allows to substantiate the use of a radiation source in it and determine main functional parameters of the optoelectronic system. The paper presents the results of the method that has been used for development of the optoelectronic system operating with the resolution of 250 nanometers. It has been shown that LED lamps can be used instead of traditionally used halogen and mercury-xenon lamps in the control equipment.

**Keywords:** microelectronics, optoelectronic system, video camera, LED.

Fig. 1. Ref.: 8 titles.

**Введение.** При промышленном производстве микроэлектронных изделий автоматизированный контроль качества является неотъемлемой частью современного технологического процесса, и в случае, если дефекты не были своевременно обнаружены, изделие будет бракованным. Обнаружение дефектов только в конце процесса значительно снижает эффективность производства вследствие того, что на производство бракованных изделий приходится затрачивать значительные временные и материальные ресурсы. Для обеспечения высокого процента выхода годных изделий необходимо обеспечить их контроль на всех стадиях производственного цикла. Поскольку структура микроэлектронного прибора представляет собой топологический рисунок, выполненный в слоях различных материалов, контроль размеров и

формы этого рисунка на соответствие проектным данным и отсутствие привнесенных в него дефектов и загрязнений занимает ведущее место в контрольных операциях. Этот контроль осуществляется на автоматизированном или автоматическом контрольном оборудовании, построенном на базе метода оптической микроскопии.

**Этапы синтеза оптоэлектронной системы.** Создание оптического контрольного оборудования представляет собой комплексную проблему, решение которой можно разбить на ряд этапов. Поскольку оптоэлектронная система определяет основные параметры контрольного оборудования – разрешающую способность и производительность, решение проблемы синтеза этой системы является главной задачей. В свою очередь, задачу можно разде-

лить на две: синтез структуры оптоэлектронной системы и синтез параметров элементов этой структуры, которые позволяют оптимальным образом решить поставленную задачу.

Синтез структуры оптоэлектронной системы особых проблем не представляет, так как в этом случае базой служит классическая схема метода оптической микроскопии. Она содержит источник света, освещающий объект контроля, оптическую увеличивающую систему с объективом высокого разрешения, строящую изображение контролируемой области объекта на фотоприемной площадке видеокамеры. Информация с видеокамеры поступает в устройство обработки и анализа данных, где в соответствии со специализированными алгоритмами происходит ее обработка и представление результатов контроля на экране монитора, а также передача их другим пользователям в системе автоматизированного управления качеством и в базы хранения данных.

Параметрический синтез требует особого внимания, так как он связан с определением функциональных параметров элементов выбранной структуры оптоэлектронной системы, которые должны гарантировать выполнение заданных требований и характеристик установки в целом, а также обеспечить условия ее работоспособности. Для этого необходимо использовать специальный метод, направленный на разработку типовых способов решения инженерных задач и проведения расчетов простыми средствами. Разработку такого метода для рассматриваемого случая можно вести на основе положений дифракционной и геометрической оптики, теории пространственной дискретизации сигналов от изображений и фотометрии.

Отправной точкой параметрического синтеза оптоэлектронной системы контроля является разрешающая способность увеличивающей оптической системы, которая характеризует ее способность давать раздельное изображение двух близкорасположенных точек объекта. Для случая некогерентного освещения в рамках волнового представления о свете разрешающая способность описывается известной формулой [1]

$$r = 0,61 \frac{\lambda}{NA}, \quad (1)$$

где  $r$  – минимальное расстояние между элементами, при котором они наблюдаются раздельно;  $\lambda$  – длина волны источника света;  $NA$  – числовая (рабочая) апертура объектива.

Графическая зависимость разрешающей способности  $r$  от длины волны  $\lambda$  для значений  $NA$ , равных 0,6 и 0,9, построенная на основании (1), а также для иммерсионного объектива с  $NA = 1,25$ , рассмотренного в [2], изображена на рис. 1. На рис. 1 отдельно выделены положение максимума чувствительности человеческого глаза (555 нм), основные ультрафиолетовые линии в спектре излучения ртутной лампы, а также известные длины волн лазеров, применяемых в качестве источников излучения в промышленном оборудовании в глубоком ультрафиолете.

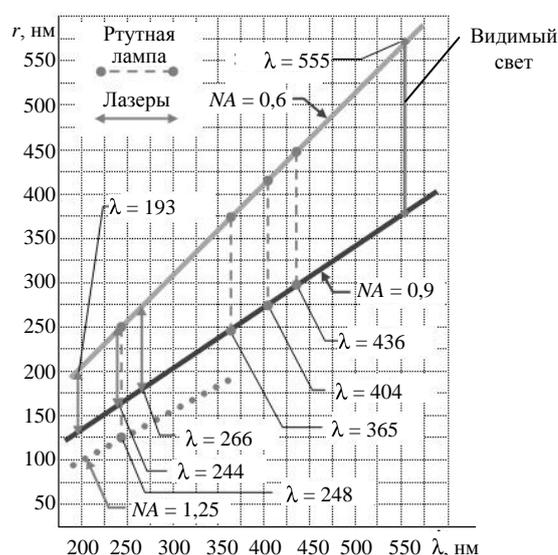


Рис. 1. Графическая зависимость разрешающей способности объективов от длины волны для значений апертур  $NA = 0,6; 0,9$  и  $1,25$

Зависимости, изображенные на рис. 1, удобно использовать при достижении компромисса в выборе рабочей длины волны  $\lambda$  источника излучения и значения апертуры объектива  $NA$ , которые обеспечивают разрешающую способность  $r$ . Выбором этих параметров и установлением характеристик источника излучения (яркости и размеров светящегося тела) завершается первый этап синтеза параметров оптоэлектронной системы.

Дальнейшая разработка метода связана с использованием положений дифракционной теории формирования оптического изображе-

ния, которая рассматривает оптическую систему как прибор, передающий спектр оптических пространственных частот, обусловленный пространственной структурой объекта, в плоскость его изображения. В этом случае максимальную пространственную частоту  $F$ , передаваемую изображению объективом с апертурой  $NA$ , можно определить с помощью выражения [3]

$$F = \frac{2NA}{\lambda}. \quad (2)$$

Особый смысл соотношение (2) приобретает в связи с использованием для регистрации изображения матричных ПЗС-фотоприемников (на приборах с зарядовой связью), так как оно позволяет установить требования к размеру пикселя матрицы. В теории передачи и преобразований информационных сигналов известна теорема Котельникова [4], согласно которой максимальный шаг выборки сигнала  $\Delta_{\max}$ , при его дискретизации, связан с пространственной частотой  $F$  соотношением

$$\Delta_{\max} = \frac{1}{2F}. \quad (3)$$

Используя (2), соотношение (3) можно переписать в виде

$$\Delta_{\max} = \frac{\lambda}{4NA}.$$

Тогда, принимая во внимание выражение (1), связь между максимальным шагом выборки сигнала  $\Delta_{\max}$  и разрешающей способностью оптической системы  $r$  выглядит следующим образом:

$$\Delta_{\max} = 0,41r. \quad (4)$$

На практике шаг выборки сигнала  $\Delta$  принимают в 1,42–12,5 раза меньше максимального значения [5], причем сокращение зависит от способа дальнейшей обработки сигнала. Если задача дискретизации решается только для целей оптической проекции поля зрения объектива на монитор, то в этом случае при выборе  $\Delta$  можно ограничиться неравенством

$$\Delta < 0,3.$$

При использовании дискретизации для прецизионных измерений размеров полупроводниковых структур целесообразно руководство-

ваться другим подходом, при котором учитываются обстоятельства последующей обработки видеоинформации. Например, в контрольных операциях технологического процесса производства полупроводниковых изделий требуется прецизионность в 1 % от измеряемого размера. С другой стороны, из практики использования CCD-видеокамер известно, что достижимая минимальная величина субпиксельного разрешения может составить около 0,02 размера пикселя. Тогда, принимая во внимание сказанное, и на основании (4) необходимо обеспечить выполнение условия для величины  $\Delta$

$$0,02\Delta = 0,41 \cdot (0,01r).$$

Откуда следует

$$\Delta < 0,2r. \quad (5)$$

На практике дискретизация осуществляется матричным фотоприемником (CCD или CMOS) видеокамеры, и шаг выборки сигнала связан с размером пикселя матрицы  $p$  и увеличением оптической системы  $\beta$  соотношением

$$p = \beta\Delta. \quad (6)$$

Выражения (5) и (6) позволяют осуществить выбор видеокамеры с величиной пикселя фотоприемной матрицы, соответствующей разрешающей способности  $r$ , определить увеличение  $\beta$  и поле зрения оптической системы. На этом завершается второй этап синтеза оптоэлектронной системы, который позволяет, используя итоги предыдущего этапа, начать предварительный габаритный расчет увеличивающей оптической системы.

На следующем этапе необходимо определить энергетические характеристики оптоэлектронной системы и установить обоснованность выбора ее компонентов – источника излучения и видеокамеры. Так как основным энергетическим параметром, характеризующим изображение, является освещенность, то задачу, которую необходимо решить, можно сформулировать как определение соответствия освещенности, создаваемой источником излучения на фотоприемнике видеокамеры, условию ее нормальной работы. В большинстве случаев изготовители указывают в спецификации минимальную освещенность видеокамеры в люксах, что удобно для сопоставления чувствительности

различных типов видеокамер в видимом диапазоне. Однако методы расчета, основанные на светотехнических единицах, используются только там, где оценка изображения осуществляется глазом человека, и не применимы за пределами видимого диапазона. В этом случае необходимо знать минимально допустимую освещенность, пересчитанную для спектрального диапазона, в котором работает источник излучения, и выраженную в энергетических величинах. Для определения нового уровня минимальной освещенности видеокамеры можно использовать следующее рассмотрение. Известно, что отклик фотоприемного элемента  $U$  на сложный по спектру интегральный поток излучения  $\Phi$  определяется выражением [6]

$$U = S\Phi, \quad (7)$$

где  $S$  – интегральная чувствительность фотоприемного прибора.

В свою очередь, из определения освещенности следует [6], что

$$\Phi = Es, \quad (8)$$

где  $E$  – освещенность светочувствительной зоны фотоприемного прибора площадью  $s$ .

Исходя из того, что минимально допустимый сигнал видеокамеры  $U$  – величина постоянная для излучения любого спектрального состава и любого представления фотометрических величин, можно на основании (7) и (8) записать следующее выражение:

$$E_{2\min} = E_{1\min} \frac{S_1}{S_2}, \quad (9)$$

где  $E_{1\min}$ ,  $E_{2\min}$  – минимальная освещенность площадки фотоприемного прибора, при которой получен его минимальный отклик в двух различных участках спектрального диапазона;  $S_1$ ,  $S_2$  – интегральная чувствительность фотоприемного элемента, определенная соответственно для этих участков.

Используя формулу (9), можно осуществлять пересчет минимальной освещенности площадки фотоприемного прибора для излучения другого спектрального состава и различного представления фотометрических величин. Для этой цели ее нужно детализировать в зависимости от поставленной задачи. Например,

часто встречающийся на практике случай, когда минимальная освещенность  $E_{1\min}$  представлена в спецификации в световых величинах для источника с функцией спектральной плотности потока излучения как  $f_1(\lambda)$ , а требуется определить минимальную освещенность  $E_{2\min}$ , выраженную в энергетических величинах для источника излучения с функцией спектральной плотности потока излучения –  $f_2(\lambda)$ , используемого за пределами видимого диапазона.

Учитывая, что световой поток излучения  $\Phi^c$  [7] определяется по формуле

$$\Phi^c = 683 \int_{380}^{780} f(\lambda)v(\lambda)d\lambda,$$

где 683 – пересчетный коэффициент энергетических величин в световые;  $f(\lambda)$  – функция спектральной плотности потока излучения;  $v(\lambda)$  – относительная спектральная чувствительность глаза, выражение (8) можно переписать для спектрального представления световых величин

$$S_{\lambda m} \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} f_1(\lambda)s(\lambda)d\lambda = S^c \cdot 683 \int_{380}^{780} f_1(\lambda)v(\lambda)d\lambda,$$

где  $f_1(\lambda)$  – функция спектральной плотности потока излучения источника, излучающего в спектральном диапазоне  $\lambda_1 - \lambda_2$ ;  $S^c$  – световая интегральная чувствительность фотоприемного элемента;  $S_{\lambda m}$  – максимальное значение спектральной чувствительности;  $s(\lambda)$  – функция спектральной чувствительности фотоприемного прибора.

В свою очередь, (8) можно аналогичным образом выразить через спектральные энергетические величины для диапазона  $\lambda_3 - \lambda_4$ , в котором работает используемый источник излучения

$$S_{\lambda m} \int_{\lambda_3}^{\lambda_4} f_2(\lambda)s(\lambda)d\lambda = S^e \cdot \int_{\lambda_3}^{\lambda_4} f_2(\lambda)d\lambda,$$

где  $S^e$  – энергетическая интегральная чувствительность фотоприемного элемента.

Далее, выделив из последних двух выражений  $S^c$  и  $S^e$  и подставив их соответственно в (9) вместо  $S_1$  и  $S_2$ , получим формулу связи минимальных освещенностей в рассматриваемом примере

$$E_{2\min} = \frac{E_{1\min} \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} f_1(\lambda) s(\lambda) d\lambda}{683 \int_{380}^{780} f_1(\lambda) v(\lambda) d\lambda} \cdot \frac{\int_{\lambda_3}^{\lambda_4} f_2(\lambda) d\lambda}{\int_{\lambda_3}^{\lambda_4} f_2(\lambda) s(\lambda) d\lambda}. \quad (10)$$

По приведенной методике можно определять связь между минимальными освещенностями видеокамер для других возможных случаев. Однако принимая во внимание обстоятельство, что доступные в применении источники света являются монохроматическими (рис. 1), дальнейший анализ можно вести для монохроматического света с длиной волны  $\lambda_i = \lambda_3 = \lambda_4$ . Тогда (10) примет следующий вид:

$$E_{2\min}(\lambda_i) = \frac{E_{1\min} \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} f_1(\lambda) s(\lambda) d\lambda}{683 \int_{380}^{780} f_1(\lambda) v(\lambda) d\lambda} \frac{1}{s(\lambda_i)}. \quad (11)$$

Если сделать два предположения, во-первых, что  $f_1(\lambda)$  близко к спектру излучения галогенной лампы, которая не излучает в ультрафиолетовой области длин волн, и, во-вторых, что видеокамера снабжена светофильтром, не пропускающим инфракрасную часть спектра, то можно считать участок спектра  $\lambda_1 - \lambda_2$  близким к видимому диапазону 380–780 нм. Если в добавление к предыдущему допустить замену спектральных распределений  $s(\lambda)$  и  $v(\lambda)$  их средними значениями  $S_{cp}$  и 0,5, то (11) примет упрощенный вид, удобный для предварительной оценки освещенности  $E_{2\min}$  в энергетических величинах

$$E_{2\min}^o(\lambda_i) = \frac{E_{1\min}^c}{683} \frac{2S_{cp}}{s(\lambda_i)}. \quad (12)$$

Для определения уровня освещенности в центре фотоприемной матрицы, который создает оптическая система с выбранным источником излучения, можно использовать формулу, приведенную в [8]:

$$E = \pi \tau L \left( \frac{NA}{\beta} \right)^2, \quad (13)$$

где  $E$  – освещенность в центре увеличенного изображения, построенного оптической системой;  $NA$  – апертура объектива;  $\beta$  – увеличение оптической системы,  $L$  – яркость источника

света;  $\tau$  – интегральный коэффициент потерь света на пути от источника к изображению.

Для расчета освещенности необходимо определить интегральный коэффициент потерь света  $\tau$ . Он формируется из потерь в оптических узлах. Поэтому необходимо детально исследовать световые потери в каждом оптическом узле, которые, в свою очередь, имеют ряд собственных составляющих. Величину интегрального коэффициента потерь света  $\tau$  определяют как произведение частных коэффициентов поглощения всех оптических узлов.

Определив все величины аргументов выражения (13), вычисляют значение освещенности в центре увеличенного изображения и сравнивают его со значением минимального уровня освещенности, полученным из выражения (12). Если освещенность в центре увеличенного изображения окажется меньше уровня освещенности видеокамеры, то аргументы выражения (13) подлежат оптимизации с целью увеличения освещенности видеокамеры.

**Синтез оптоэлектронной системы на основе светодиодных источников света.** Описанный метод синтеза был опробован при разработке оптоэлектронной системы, работающей с разрешением 250 нм. Это разрешение предопределяет в соответствии с рис. 1 длину волны источника 365 нм и числовую апертуру объектива 0,9. На основании (5) установлен шаг выборки сигнала 39 нм.

Для регистрации изображений выбрана цифровая видеокамера CM-140 GE-UV фирмы JAI. Матрица имеет повышенную чувствительность в ультрафиолетовом диапазоне от 200 до 400 нм и размер пикселя 4.65×4.65 мкм. Характеристики видеокамеры определили увеличение и поле зрения оптоэлектронной системы. На основании (6) увеличение оптической системы составило 120 крат с диагональю поля зрения 67 мкм.

Для определения энергетической освещенности на длине волны 365 нм, эквивалентной световой освещенности со значением 0,3 лк, которая приведена в спецификации, использована формула (12). В результате получено, что при времени экспозиции видеокамеры 1/31 с, усилении +0 дБ и 100%-м уровне видеосигнала источник света должен обеспечить на фотоприемной площадке видеокамеры энергетическую освещенность не менее 0,005 Вт/м<sup>2</sup>. При этой

освещенности гарантировано отношение сигнал–шум 50 дБ, которое является достаточным для представления видеоданных в 255 уровнях серого.

При выборе источника излучения объектами для анализа могут быть ультрафиолетовый светодиод NCSU033A фирмы Nichia или ртутно-ксеноновая лампа L2422 компании Hamamatsu с выделением линии 365 нм. Преимущества светодиода во многом очевидны и могут быть исследованы отдельно, поэтому представляет интерес энергетическое рассмотрение с использованием светодиода. Используя данные из спецификации на светодиод, определена его энергетическая яркость, которая составила не менее 40000 Вт/(ср·м<sup>2</sup>).

На основании данных предварительного габаритного расчета можно оценить интегральный коэффициент потерь света  $\tau$ , который составил не более 0,013. Для этих параметров достигнутая освещенность в соответствии с (13) равна 0,092 Вт/м<sup>2</sup>, что в 18 раз превышает минимальную освещенность цифровой камеры SM 140 GE-UV. Другими словами, этот вывод можно сформулировать так: для обеспечения рабочих условий камере по освещенности светодиоду потребуется 5,4 % величины от его максимального рабочего тока, или 27 мА.

Предложенная методика синтеза оптоэлектронной системы использована в дальнейшем при создании на НПРУП «КБТЭМ-ОМО» опытного образца установки контроля микро-размеров топологических структур на полупроводниковых пластинах ЭМ-6239 со светодиодами видимого и ультрафиолетового диапазонов для наблюдения и контроля микроэлектронных структур.

## ВЫВОДЫ

1. При создании оптоэлектронных систем высокого разрешения для оборудования автоматического контроля микроэлектронных структур в качестве источников света можно использовать светодиоды вместо традиционных ламп накаливания и газоразрядных ламп, которые позволяют снизить потребляемую электрическую мощность, повысить стабильность получаемых данных, экономичность и безопасность, улучшить весогабаритные параметры и упростить сервисное обслуживание.

2. При выборе светодиода и видеокамеры для оптоэлектронной системы необходимо ис-

пользовать разработанный метод, который позволяет установить обоснованность применения светодиода как источника излучения и определить основные функциональные параметры системы в зависимости от требуемой разрешающей способности.

## ЛИТЕРАТУРА

1. **Борн, М.** Основы оптики / М. Борн, Э. Вольф. – М.: Наука, 1973.
2. **Ultra High Resolution DUV Water Immersion Microscope Objective** / W. Vollrath [et al.] // DGaO Proceedings. – 2005. – A28. – P. 2.
3. **Родионов, С. А.** Основы оптики / С. А. Родионов. – СПб.: СПбГУ ИТМО (ТУ), 2000. – 167 с.
4. **Гоноровский, И. С.** Радиотехнические цепи и сигналы: учеб. для вузов / И. С. Гоноровский. – 4-е изд., перераб. и доп. – М.: Радио и связь, 1986. – 512 с.
5. **Натаровский, С. Н.** Методы проектирования современных оптических систем: учеб. пособие / С. Н. Натаровский. – СПб.: СПбГУ ИТМО, 2009. – 176 с.
6. **Мирошников, М. М.** Теоретические основы оптико-электронных приборов: учеб. пособие для вузов / М. М. Мирошников. – Л.: Машиностроение (Ленингр. отд.), 1977. – 600 с.
7. **Якушенков, Ю. Г.** Теория и расчет оптико-электронных приборов: учеб. для вузов / Ю. Г. Якушенков. – Изд. 3-е, перераб. и доп. – М.: Машиностроение, 1989. – 360 с.
8. **Микроскопы** / Г. Е. Скворцов [и др.]. – Л.: Машиностроение, 1969.

## REFERENCES

1. **Born, M.** Fundamentals of Optics / M. Born, E. Wolf. – M.: Nauka (Science), 1973.
2. **Ultra High Resolution DUV Water Immersion Microscope Objective** / W. Vollrath [et al.] // DGaO Proceedings. – 2005. – A28. – P. 2.
3. **Rodionov, S. A.** Fundamentals of Optics / S. A. Rodionov. – St. Petersburg: St. Petersburg State University ITMO (TU), 2000. – 167 p.
4. **Gonorovsky, I. S.** Radio-Technical Circuits and Signals: Manual for HEI // I. S. Gonorovsky. – 4<sup>th</sup> Revised and Updated Edition. – M.: Radio i Svyaz (Radio and Communication), 1986. – 512 p.
5. **Natarovsky, S. N.** Methods for Designing of Modern Optical Systems: Manual / S. N. Natarovsky. – St. Petersburg: St. Petersburg State University ITMO, 2009. – 176 p.
6. **Miroshnikov, M. M.** Theoretical Fundamentals of Optical and Electronic Devices: Manual for HEI / M. M. Miroshnikov. – L.: Mashinostroenie (Mechanical Engineering) (Leningrad Branch), 1977. – 600 p.
7. **Yakushenkov, Yu. G.** Theory and Calculation of Optical and Electronic Devices: Manual for HEI / Yu. G. Yakushenkov. – Revised and Updated 3<sup>rd</sup> Edition. – M.: Mashinostroenie (Mechanical Engineering), 1989. – 360 p.
8. **Microscopes** / G. E. Skvortsov [et al.]. – L.: Mashinostroenie (Mechanical Engineering), 1969.

Поступила 23.10.2013