

УДК 621.384.3

Фильтрующее устройство с использованием многолучевой интерферометрии

А. М. Филачев, Л. Д. Сагинов, А. С. Кононов, А. Н. Свиридов, В. Л. Бакуменко
ФГУП «НПО "Орион"» — Государственный научный центр РФ, Москва, Россия

Приведены расчеты параметров фильтрующего устройства (ФУ), в котором для фильтрации оптического излучения используется многолучевая интерференция (МИ). Ожидается, что это устройство может быть пригодно для получения изображений объектов в заданных узких спектральных диапазонах — spectral imaging (SI).

В последние годы возрастает внимание к устройствам, обеспечивающим получение изображений объектов в заданных узких спектральных диапазонах. С помощью этих устройств удается наблюдать в изображениях различные фрагменты, отличающиеся (в выбранном узком спектральном диапазоне) различной спектральной яркостью, обусловленной разными коэффициентами отражения, поглощения или излучения. При наблюдении этих же объектов в широком спектральном диапазоне (например с помощью обычного тепловизора) яркости фрагментов усредняются, и объем получаемой оптической информации значительно уменьшается. Для реализации SI могут быть использованы методы как непосредственной оптической фильтрации принимаемого излучения с помощью перестраиваемых оптических фильтров различных видов (акустооптические, интерференционные, интерференционно-поляризационные и др.) [1—7], так и выделения спектральных изображений, основанные на компьютерной обработке оптических полей, регистрируемых матричным приемником (например, сигналов после Фурье-интерферометра, голограмм и др.) [8—11].

В статье приводятся расчеты параметров ФУ, в котором для фильтрации используется МИ.

Фильтрующее устройство с использованием многолучевой интерференции

Фильтрация в устройстве осуществляется вследствие МИ в интерферометрах, в которых отражающие поверхности обращены друг к другу пластин каждого интерферометра оптически ополаризованы и не имеют металлических или интерференционных зеркальных покрытий.

Интерферометры установлены так, что углы между оптической осью ФУ и гранями первого и второго интерферометров находятся в одной плоскости и равны, соответственно, α и $-\alpha$, углы между оптической осью ФУ и гранями следующей второй пары интерферометров находятся в плоскости, перпендикулярной плоскости, в которой находятся углы первой пары интерферометров и

равны, соответственно, α и $-\alpha$. Причем α имеет величину порядка угла поля зрения фильтрующего устройства 2β .

Для фильтрации выбранной длины волны λ_m устанавливаются следующие расстояния между отражающими гранями пластин интерферометров: $d_1 = (\lambda_{m0}/2) \cdot k$, $k = 1$ или 2 , $d_n = (n-1) \cdot d_1$ или $n \cdot d_1$, где $\lambda_{m0} = \lambda_m \cdot \cos\theta$, θ — угол, под которым излучение падает на внутренние грани интерферометра.

Все интерферометры изготовлены с возможностью прецизионного и контролируемого изменения расстояния между отражающими пластинами. Пластины интерферометров изготовлены из материалов с высоким показателем преломления и прозрачных для излучения в рабочем спектральном диапазоне.

Оптическая схема ФУ с МИ приведена на рис. 1.

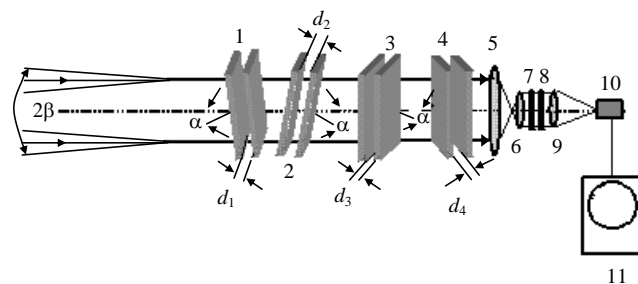


Рис. 1. Оптическая схема ФУ с использованием многолучевой интерференции:

1—4 — интерферометры; 5, 6 — линзы телескопа, согласующие сечение и угол расхождения фильтруемого потока излучения с входным отверстием и апертурным углом прибора, регистрирующего отфильтрованное излучение, например, тепловизора; 7, 8 — фильтры, отсекающие излучение с длинами волн, находящимися за пределами рабочего спектрального диапазона фильтрующего устройства.

Кроме того, на рисунке изображены основные элементы приемника пользователя — тепловизора, регистрирующего отфильтрованное излучение: 9 — объектив; 10 — матричное приемное устройство; 11 — монитор

Для рассматриваемого примера реализации ФУ с рабочим спектральным диапазоном 8—11 мкм наиболее подходящими материалами для пластин являются германий или кремний. Будем считать,

что пластины изготовлены из германия, имеющего показатель поглощения в рабочем спектральном диапазоне $\xi = 0,025 \text{ см}^{-1}$. Толщина каждой пластины $t = 0,5 \text{ см}$, диаметр пластин $D_p = 7,5 \text{ см}$. Все интерферометры установлены под углом $|\alpha| = 4^\circ$ к оптической оси устройства. Наружные грани пластин каждого интерферометра имеют просветляющее покрытие в диапазоне 8—11 мкм, уменьшающее отражение от каждой грани до $R = 0,05$. Пропускание каждой пластины τ оценивается следующим образом:

$$\tau = e^{-\xi \cdot t} \cdot (1 - R),$$

тогда, пропускание одной пластины $\tau = 0,938$, пропускание восьми пластин — $\tau^8 = 0,6$. Линзы телескопа (см. рис. 1, поз. 5, 6) согласуют сечение и угол, в котором распространяется фильтруемый поток излучения с входным отверстием объектива и углом поля зрения тепловизора и выбираются вместе с объективом последнего таким образом, чтобы пучки фильтруемого излучения, распространяющиеся под углами $|\beta| = 4^\circ$ к оптической оси устройства, фокусировались на крайние пиксели матричного приемника тепловизора. Для этого достаточно, например, телескопа с кратностью 1/3 и объектива с фокусным расстоянием $f = 4,7 \text{ см}$ (при размере матрицы $2 \times 2 \text{ см}$). При этом диаметр сфокусированной моды ($\lambda = 10 \text{ мкм}$) в плоскости матричного приемника равен $D_0 = 24 \text{ мкм}$. В качестве фильтра 7, отсекающего излучение, с длинами волн, меньшими 5,6—7 мкм (в зависимости от расстояний между отражающими гранями), может быть использован слой (пластинка) из InSb (при температуре 78 К) толщиной около 0,1 мм. Излучение с длинами волн, бóльшими 13—15 мкм (в том числе побочные максимумы), можно подавить с помощью фильтра 8, изготовленного из слоя (пластинки) VF_2 толщиной около 1 мм [12]. Однако абсорбционные фильтры не допускают в процессе работы точной подстройки границ фильтрации и требуют охлаждения при работе с охлаждаемыми матричными приемниками. Поэтому в ряде случаев целесообразно использовать фильтры с ПВО, поскольку эти фильтры не требуют охлаждения и их можно точно подстраивать по λ [13], причем фильтр, отсекающий коротковолновое излучение, должен быть сделан из оптических материалов, образующих ГР⁺, а фильтр, отсекающий длинноволновое излучение, — из материалов, образующих ГР⁻.

Приведем основные соотношения, описывающие аппаратную функцию ФУ. Можно показать, что $t_n(\alpha, d_n, \lambda)$ и $T_n(\alpha, d_n, \lambda)$ — пропускание подобного интерферометра, соответственно, для излучения с поляризацией перпендикулярной плоско-

сти падения и параллельной плоскости падения, зависит от угла падения α , расстояния между внутренними гранями d_n и длины волны λ следующим образом:

$$t_n(\alpha, d_n, \lambda) = \frac{1}{\left[1 + \frac{1}{4} \cdot (n(\lambda)^2 - 1)^2 \frac{\sinh^2 \left[2\pi \frac{d_n}{\lambda} (\sin(\alpha)^2 - 1)^{\frac{1}{2}} \right]}{(1 + n(\lambda)^2) \cdot \cos(\alpha)^2 - \cos(\alpha)^4} \right]};$$

$$T_n(\alpha, d_n, \lambda) = 1 / \left\{ 1 + \frac{1}{4} \left(\sin(\alpha)^2 - 1 + \frac{1}{n(\lambda)^2} \sin(\alpha)^2 \right)^2 (n(\lambda)^2 - 1)^2 \times \frac{\sinh^2 \left[2\pi \frac{d_n}{\lambda} (\sin(\alpha)^2 - 1)^{\frac{1}{2}} \right]}{n(\lambda)^2 \left(1 - \frac{1}{n(\lambda)^2} \sin(\alpha)^2 \right) (\sin(\alpha)^2 - 1)} \right\},$$

где $n(\lambda)$ — зависимость коэффициента преломления германия от длины волны [12].

$$n(\lambda) = 3,99931 + 0,391707 \cdot \frac{1}{\lambda^2 - 0,028} + 0,163492 \times \left(\frac{1}{\lambda^2 - 0,028} \right)^2 + (-0,0000060)\lambda^2 + (-0,00000053)\lambda^4.$$

Тогда пропускание для неполяризованного излучения $T_{nn}(\alpha, d_n, \lambda)$, падающего на интерферометр под углом α равно:

$$T_{nn}(\alpha, d_n, \lambda) = \frac{T_n(\alpha, d_n, \lambda) + t_n(\alpha, d_n, \lambda)}{2}.$$

Суммарное пропускание $Z_n(\alpha, d_n, \lambda)$ четырех установленных друг за другом интерферометров с расстояниями между пластинами d_1, d_2, d_3, d_4 для излучения, падающего на каждый интерферометр под углом $|\alpha|$, выражаются следующим произведением:

$$Z_n(\alpha, d_n, \lambda) = T_{n1}(\alpha, d_1, \lambda) \cdot T_{n2}(\alpha, d_2, \lambda) \times T_{n3}(\alpha, d_3, \lambda) \cdot T_{n4}(\alpha, d_4, \lambda).$$

На рис. 2, а, б показаны зависимости контуров пропускания от длины волны (аппаратной функции фильтрующего устройства, содержащего четыре установленных друг за другом интерферо-

метра) $Z_n(\alpha, d_n, \lambda)$, рассчитанные для пучка, распространяющегося вдоль оптической оси устройства, при $|\alpha| = 4^\circ$ и следующих расстояниях между пластинами интерферометров:

• на рис. 2, а:

$$Z_1(\lambda): d_1 = 4 \text{ мкм}, d_2 = 2 \cdot d_1, d_3 = 3 \cdot d_1, d_4 = 4 \cdot d_1;$$

$$Z_2(\lambda): d_1 = 4,5 \text{ мкм}, d_2 = 2 \cdot d_1, d_3 = 3 \cdot d_1, d_4 = 4 \cdot d_1;$$

$$Z_3(\lambda): d_1 = 5 \text{ мкм}, d_2 = 2 \cdot d_1, d_3 = 3 \cdot d_1, d_4 = 4 \cdot d_1;$$

$$Z_4(\lambda): d_1 = 5,5 \text{ мкм}, d_2 = 2 \cdot d_1, d_3 = 3 \cdot d_1, d_4 = 4 \cdot d_1;$$

• на рис. 2, б:

$$Z_1(\lambda): d_1 = 4 \text{ мкм}, d_2 = d_1, d_3 = 3 \cdot d_1, d_4 = 4 \cdot d_1;$$

$$Z_2(\lambda): d_1 = 4,5 \text{ мкм}, d_2 = d_1, d_3 = 3 \cdot d_1, d_4 = 4 \cdot d_1;$$

$$Z_3(\lambda): d_1 = 5 \text{ мкм}, d_2 = d_1, d_3 = 3 \cdot d_1, d_4 = 4 \cdot d_1;$$

$$Z_4(\lambda): d_1 = 5,5 \text{ мкм}, d_2 = d_1, d_3 = 3 \cdot d_1, d_4 = 4 \cdot d_1.$$

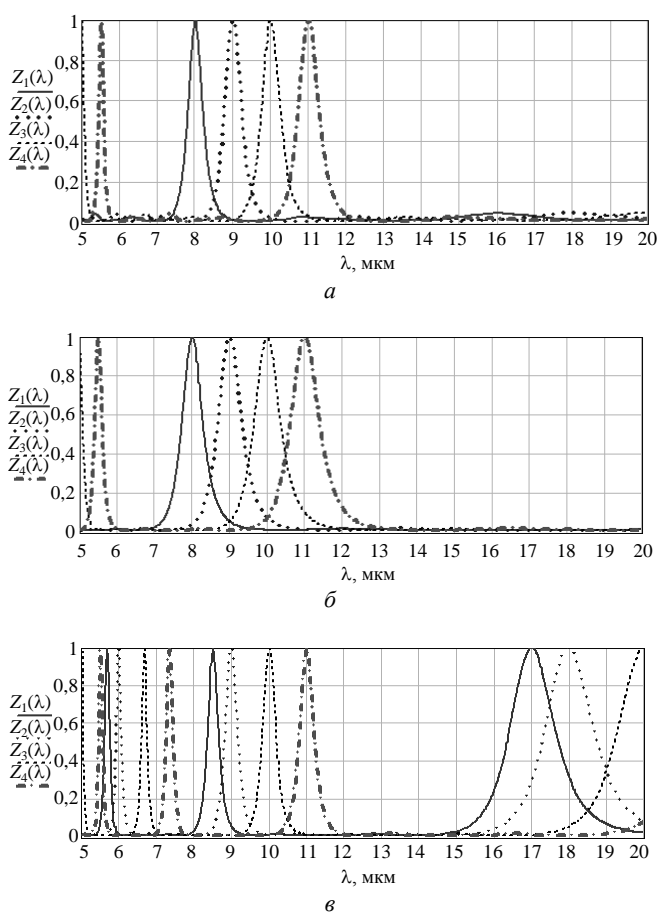


Рис. 2. Зависимости контуров пропускания ФУ с МИ от длины волны

Из сравнения приведенных зависимостей на рис. 2, а, б видно, что качество фильтрации выше у ФУ с расстояниями между пластинами интерферометров, при которых были рассчитаны зависимости, приведенные на рис. 2, б, поскольку в них практически отсутствуют побочные максимумы, однако при этом имеет место увеличение ширины контура фильтрации.

Видно, что в обоих случаях (относятся к фильтрам 1-го порядка) требуется использование

дополнительного фильтра, отсекающего излучение с длинами волн, меньшими 5,6 мкм.

На рис. 2, в показаны зависимости контуров пропускания от длины волны (аппаратной функции фильтрующего устройства — фильтра 2-го порядка, содержащего четыре установленных друг за другом интерферометра) $Z_n(\alpha, d_n, \lambda)$, рассчитанные для пучка, распространяющегося вдоль оптической оси устройства, при $|\alpha| = 4^\circ$ и следующих расстояниях между пластинами интерферометров:

$$Z_1(\lambda): d_1 = 8,5 \text{ мкм}, d_2 = d_1, d_3 = 2 \cdot d_1, d_4 = 3 \cdot d_1;$$

$$Z_2(\lambda): d_1 = 9 \text{ мкм}, d_2 = d_1, d_3 = 2 \cdot d_1, d_4 = 3 \cdot d_1;$$

$$Z_3(\lambda): d_1 = 10 \text{ мкм}, d_2 = d_1, d_3 = 2 \cdot d_1, d_4 = 3 \cdot d_1;$$

$$Z_4(\lambda): d_1 = 11 \text{ мкм}, d_2 = d_1, d_3 = 2 \cdot d_1, d_4 = 3 \cdot d_1.$$

Видно, что увеличение расстояний между пластинами интерферометров в два раза приводит к уменьшению ширины линии пропускания (т. е. к увеличению разрешающей способности устройства), однако при этом возникает необходимость в фильтрах, отсекающих не только коротко-, но и длинноволновое излучение.

Устройство работает следующим образом.

Пусть требуется произвести фильтрацию ИК-излучения, поступающего на матричное приемное устройство тепловизора. Для выделения излучения с выбранной длиной волны λ_m , принадлежащей рабочему спектральному диапазону устройства ($\lambda_1 \leq \lambda_m \leq \lambda_n$), устанавливаются следующие расстояния между пластинами интерферометров, при которых происходит выделение этой длины волны: $d_1 = (\lambda_m/2) \cdot k$, $k = 1$ или 2 ; $d_n = (n-1) \cdot d_1$ или $n \cdot d_1$, $\lambda_1 \leq \lambda_m \leq \lambda_n$.

Например, для выделения излучения с длиной волны $\lambda_m = 10$ мкм можно установить любой из четырех возможных наборов расстояний между пластинами интерферометров:

Вариант 1. $Z_3(\lambda): d_1 = 5$ мкм, $d_2 = 2 \cdot d_1$, $d_3 = 3 \cdot d_1$, $d_4 = 4 \cdot d_1$.

Вариант 2. $Z_3(\lambda): d_1 = 5$ мкм, $d_2 = d_1$, $d_3 = 2 \cdot d_1$, $d_4 = 3 \cdot d_1$.

Вариант 3. $Z_3(\lambda): d_1 = 10$ мкм, $d_2 = d_1$, $d_3 = 2 \cdot d_1$, $d_4 = 3 \cdot d_1$.

Вариант 4. $Z_3(\lambda): d_1 = 10$ мкм, $d_2 = 2 \cdot d_1$, $d_3 = 3 \cdot d_1$, $d_4 = 4 \cdot d_1$.

Результаты расчетов аппаратных функций устройства для первых трех возможных вариантов расстояний приведены на рис. 2, а—в.

В результате из полихроматического пучка излучения, распространяющегося вдоль оптической оси (в пределах дифракционного угла, определяемого апертурным отверстием устройства), будет выделено излучение с длиной волны $\lambda_m = 10$ мкм, которое будет сфокусировано объективом 9 (см. рис. 1) на пиксел, находящийся в середине средней строки матричного приемника 10 (см. рис. 1).

При выбранных размерах пластин, параметрах объектива, размерах матрицы и кратности телескопа пучки с дифракционной расходимостью, распространяющиеся под углами $|\beta|$ к оптической оси устройства (пространственные моды [14]), будут фокусироваться на оптически сопряженные с ними пиксели, расположенные в начале и в конце первой и последней строк матрицы. Диаметр дифракционных пятен на пикселях будет около 24 мкм.

Таким образом, любой пучок с дифракционной расходимостью, распространяющийся под углом к оптической оси системы, меньшим чем $|\beta|$, будет сфокусирован на оптически сопряженный с ним пиксел матрицы. Так как устройство фильтрует большое число пучков с дифракционной расходимостью, распространяющихся под различными углами к оптической оси, а интерферометры развернуты под углами 4° к оптической оси, углы падения пучков на пластины интерферометров различны и меняются в пределах $0-8^\circ$. Это приводит к дополнительному (по сравнению, с расчетами для пучка, распространяющегося вдоль оси) уширению аппаратной функции и смещению максимума пропускания в сторону более коротких волн.

На рис. 3 показаны зависимости контуров пропускания (аппаратной функции) интерферометра $Z_0(\lambda)$ и $Z_1(\lambda)$, рассчитанные, соответственно, для случаев минимального (0°) и максимального (8°) углов падения пучков.

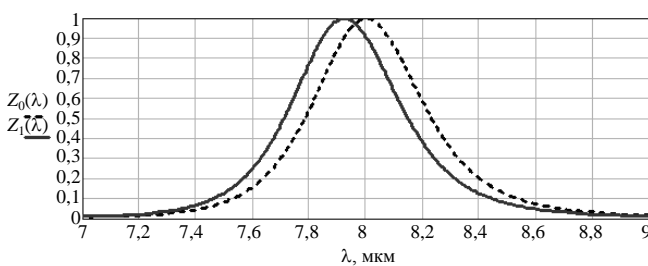


Рис. 3. Зависимости контуров пропускания интерферометра $Z_0(\lambda)$ и $Z_1(\lambda)$, рассчитанные, соответственно, для случаев минимального (0°) и максимального (8°) углов падения пучков

Видно, что аппаратная функция фильтрации для пучков, падающих на интерферометры под разными углами, уширяется не более чем на 20 %, что вполне допустимо.

Определим максимальное число элементов изображения (число пространственных мод), которое может пропустить фильтрующее устройство.

Число пространственных мод (для $\lambda = 10$ мкм), пропускаемых фильтрующим устройством, можно определить по следующей формуле [14]:

$$M = \frac{1}{4} \pi^2 D_p^2 \frac{\beta^2}{\lambda^2}.$$

При $D_p = 7,5$ см и $\beta = 4^\circ$ фильтрующее устройство может пропустить не менее $6,7 \cdot 10^5$ мод, что в несколько раз больше, чем требуется для приема изображения современной ИК-матрицей.

Итак, фильтрующее устройство не будет ограничивать число точек изображения, регистрируемое ФУ с тепловизором и при этом позволит получать изображения на любой из избранных длин волн в рассматриваемом рабочем спектральном диапазоне.

Заключение

Отметим достоинства и недостатки, присущие предлагаемому ФУ.

К достоинствам ФУ с МИ можно отнести слабую зависимость аппаратной функции от длины волны и принципиальную возможность увеличения спектрального разрешения путем увеличения числа интерферометров, к недостаткам – необходимость (в большинстве случаев) в дополнительных фильтрах, отсекающих коротковолновое излучение, и необходимость в прецизионной перестройке расстояний между пластинами всех интерферометров для фильтрации заданной длины волны.

Литература

1. Chang I. C. Tunable acoustooptic filtering. An overview: Proc. SPIE. 1976. V. 90. P. 12—22.
2. Волошинов В. Б., Миронов О. В. Спектральная акустооптическая фильтрация изображений в ближнем ИК-диапазоне// Письма в ЖТФ. 1988. Т. 14. № 17. С. 1541—1544.
3. Волошинов В. Б., Миронов О. В., Парыгин В. Н. Видеофильтер на кристалле парателлурита// Вестник Моск. ун-та. 1989. Сер. 3. Т. 30. № 2. С. 41—45.
4. Suhre D. R., Gottlieb M., Taylor L. H., Melamed N. T. Spatial resolution of imaging noncollinear acousto-optic filters// Opt. Eng. 1992. V. 31. P. 2118—2121.
5. Glenar D. A., Hillman J. J., Saif B., Bergstrahl J. Acousto-optic imaging spectropolarimetry for remote sensing// Appl. Opt. 1994. V. 33. P. 7412—7424.
6. Gupta N., Dahmani R., Bennett K. et al. Progress in AOTF hyperspectral imagers// Proc. SPIE. 2000. V. 4054. P. 30—38.
7. Schaeptman M. E., Schlapfer D., Muller A. Performance Requirements for Air borne Imaging Spectrometers// Proc. of SPIE. 2002. V. 4480. P. 23—31.
8. Zhan Gao, Oka Kazuhiro, Ishigaki Tsuyoshi, Bada Naoshi. Static Fourier — transform spectrometer based on Savart polariscope: Proc. of SPIE. 2002. V. 4480. P. 198—203.
9. Curtis E. Volin, Jhon P. Garcia, Eustace L. Dereniak, Michael R. Descour. Midwave-Infrared Snapshot Imaging Spectrometer: Ibid. P. 355—366.
10. R. Glenn Sellar, Glenn D. Boreman, Laurel E. Kirkland. Comparison of signal collection abilities of different classes of imaging spectrometers: Ibid. V. 4816.
11. Haring R., Pollock R., Cross R. Wide — field — of View Imaging Spectrometr (WFIS) Enginering Model Laboratory tests and Field Demonstration: Ibid. 2003. V. 5152. P. 51—59.

12. Филачев А. М., Сагинов Л. Д., Кононов А. С., Свиридов А. Н., Бакуменко В. Л. Спектральная фильтрация изображений с использованием явления полного внутреннего отражения // Электронный журнал "Исследовано в России". 2005. № 159. С. 1656—1671. <http://zhurnal.ape.relarn.ru/articles/2005/159.pdf>.

13. Воронкова Е. М., Гречушников Б. Н., Дистлер Г. И., Петров И. П. Оптические материалы для инфракрасной техники. — М.: Наука, 1965.

14. Гальярди Р. М., Карп Ш. Оптическая связь. — М.: Связь, 1978.

Статья поступила в редакцию 11 октября 2006 г.

The filtering device with use of the multibeam interferometry

A. M. Filachev, L. D. Saginov, A. S. Kononov, A. N. Sviridov, V. L. Bakumenko
Orion Research-and-Production Association, Moscow, Russia

Calculation of parameters of the filtering device have been made. For a filtration of optical radiation, the multibeam interference is used. It is expected that this device can be suitable for reception of images of objects in the set narrow spectral ranges — spectral imaging (SI).

УДК 621.383.4/5

Исследование процесса формирования индиевых микроконтактов на поверхности кремниевой пластины

Н. И. Батырев, Е. О. Драчева, Е. А. Климанов, А. Р. Микертумяни, Н. Н. Серегина
ФГУП «НПО "Орион"» — Государственный научный центр РФ, Москва, Россия

Приводится анализ устранения проблем, возникающих при получении индиевых контактных столбиков для стыковки кремниевых БИС с фотоприемными матрицами на основе соединений кадмий–ртуть–теллур (КРТ) [1–6]. Изучены операции базового процесса: сушка фоторезиста, получение слоев индия на кремниевой структуре, травление слоев индия. Показан базовый технологический процесс, в результате проведения которого на стыковочной поверхности образуются дефекты в виде вздутий в окрестности контактного столбика.

Как показал теоретический анализ и последующие практические результаты, причина образования вздутий в окрестности контактного столбика заключается в том, что в процессе сушки структуры (рис. 1, а) не происходит полного удаления растворителя из слоя фоторезиста, так как в условиях относительно равномерного распределе-

ния температуры по толщине структуры фоторезист уплотняется у поверхности, что препятствует полному выходу растворителя. В дальнейшем расширение растворителя под действием температур задубливания и напыления индия приводит к образованию вздутий (рис. 2).

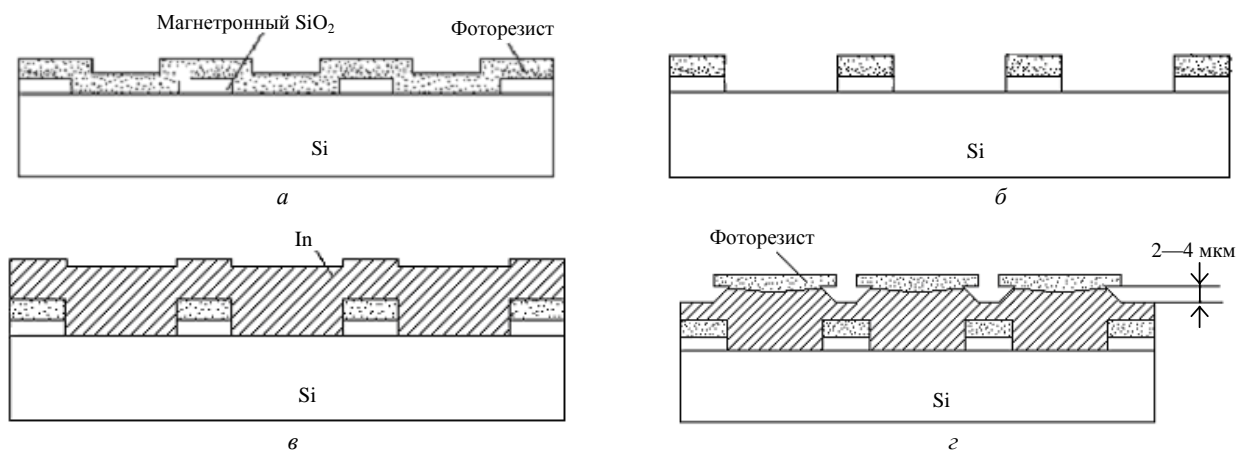


Рис. 1. Схема получения индиевых контактных столбиков на кремниевой пластине: а — сушка фоторезиста в термостате (100 °С, 60—120 мин); б — проявление фоторезиста, задубливание; в — напыление индия; г — фотолитография по слою In (1-я стадия травления индия)