ФОТОЭЛЕКТРОНИКА

УДК 621.383.4/5:621.315.59

PACS: 07.07.Df, 07.57.-c, 81.05.Ea, 81.65.Rv

Распределение чувствительности по площади пикселя матричного фотоприемника, ограниченной дифракционным пределом сканирующей маски

А. А. Лопухин, К. О. Болтарь, В. М. Акимов, М. А. Арбузов

Исследовано распределение чувствительности по площади пикселя матричного фотоприемника на основе антимонида индия с помощью неразрушающего метода сканирующей маски на основе открытой зондовой установки ускоренного тестирования.

Ключевые слова: матричный фотоприемник, МФП, взаимосвязь, сканирующая маска, открытая зондовая установка, фотошаблон, дифракция.

DOI: 10.51368/1996-0948-2021-5-44-52

Введение

Одним из важнейших параметров матричного фотоприемника (МФП) средневолнового ИК-диапазона является пространственное разрешение. Современные ИК МФП изготавливаются по гибридной схеме, в которой БИС считывания соединяется с фоточувствительной матрицей при помощи индиевых (In) микроконтактов с последующим утоньшением [1], причем со все меньшим шагом, вплоть до 10÷5 мкм [2].

В обычном способе анализа пространственного разрешения получается распределение чувствительности по площади пикселя

Россия, 111538, Москва, ул. Косинская, 9.

Статья поступила в редакцию 02 октября 2021 г.

© Лопухин А. А., Болтарь К. О., Акимов В. М., Арбузов М. А., 2021

матричного фотоприёмника путем сканирования сфокусированного пятна вдоль фокальной плоскости, откуда вычисляются такие важные параметры, как величина взаимосвязи и частотно-контрастная характеристика.

С увеличением формата МФП растет фоточувствительная площадь, что усложняет получение пространственного разрешения во всех точках МФП, особенно в связи с уменьшением шага вблизи дифракционного предела, что требует его оперативного контроля по всей площади МФП. Также этому способствует зависимость пространственного разрешения от толщины и диффузионной длины неосновных носителей заряда фоточувствительного слоя МФП на основе InSb, которые могут значительно отличаться не только по площади МФП, но и от образца к образцу [3, 4].

В указанном случае возникают большие трудности в создании аппаратуры формирования точки размеров меньше пикселя, особенно при использовании охлаждаемой диафрагмы, которая ограничивает относительное отверстие и, тем самым, увеличивает дифракционное размытие. У известного вышеописанного метода есть и другие недостатки, обусловленные наличием искажающих оптических элементов: входное окно, охлаждаемая диафрагма и фильтр.

Другой метод на основе клиньев (наклонного острого края) для измерения ча-

Лопухин Алексей Алексеевич¹, нач. участка измерений, к.т.н.

Болтарь Константин Олегович^{1,2}, нач. НТК, профессор, д.ф.-м.н.

Акимов Владимир Михайлович¹, гл. специалист.

Арбузов Максим Алексеевич¹, инженер-испытатель 2 кат.

¹ АО «НПО «Орион».

E-mail: orion@orion-ir.ru

² Московский физико-технический институт (национальный исследовательский университет). Россия, 141701, Московская обл., г. Долгопрудный, Институтский пер., 9.

стотно-пространственного отклика как аппроксимации частотно-контрастной характеристики, описан в стандарте ISO 12233:2000 [5] и применён, например, в двухцветном фотоприемнике средневолнового и длинноволнового ИК-диапазонов сверхрешёток II-типа на основе A_3B_5 [6]. В этом методе металлическая маска сформирована непосредственно на тыльной стороне утоньшенного фотоприемника, что исключает ошибки, связанные с частотно-контрастной характеристикой оптической системы, фокусирующей пятно.

Одним из наиболее перспективных является способ из работы [7], основанный на методе сканирующей маски, изготовленной напылением золотого покрытия непосредственно на утоньшенной структуре матричного фотоприёмника и сформированной системой маленьких прозрачных окошек специальным образом с шагом, близким к кратности шага матричного фотоприемника (см. рис. 1, a). Это позволяет получать одновременно как распределение чувствительности по площади пикселя, так и по всей площади матричного фотоприёмника. У последних двух методов основными недостатками являются разрушающее формирование маски на матричном фотоприемнике и невозможность стандартной процедуры калибровки (двухточечной коррекции) для выравнивания чувствительности [8].

Кроме того, вышеприведенные методы характеризуются низкой оперативностью, высокой трудоемкостью и стоимостью измерения зависимостей от различных параметров, влияющих на распределение чувствительности по площади пикселя матричного фотоприёмника.

Целью данной работы являлось получение распределения чувствительности по площади пикселя матричного фотоприемника на основе антимонида индия с помощью неразрушающего метода сканирующей маски на основе открытой зондовой установки ускоренного тестирования.



Рис. 1. Топология сканирующей маски (а) и рисунок оперативного неразрушающего метода получения распределения чувствительности по площади пикселя матричного фотоприёмника с помощью сканирующей маски на основе открытой зондовой установки (б).

Распределение чувствительности по площади пикселя матричного фотоприемника и методы изготовления сканирующей маски

Предложен метод сканирующей маски с использованием открытой зондовой установки ускоренного тестирования МФПУ при температуре жидкого азота [9], отличающийся тем, что маску с шагом окошек, превышающем диффузионную длину неосновных носителей заряда, формируют на пластине из кремния с целью совпадения температурного коэффициента линейного расширения с БИС считывания размером больше габаритов МФП, которая опускается на утоньшенную и просветленную структуру неразрушающим способом непосредственно во время охлаждения под тяжестью собственного веса и выравнивается по углу при помощи зондового манипулятора с фиксированным расположением контактов в зондовой установке открытого типа (перед этим МФП может калиброваться) (см. рис. 1, δ). Выравнивание по углу (рис. 2, z) осуществляется при поднятии зондового манипулятора с фиксированным расположением контактов относительно БИС считывания до уровня пластины с маской и сдвигом ее по оси перпендикулярно линии выравнивания фиксированных зондов. При этом пластина с маской должна быть порезана по линиям, параллельным направлению расположения окошек в маске.

Из условий преломления излучения на границе двух сред (рис. 1, δ): можно записать следующие соотношения:

$$\frac{\sin\alpha}{\sin\beta} = n_{Mask} \ \ \Pi \ \frac{\sin\alpha}{\sin\gamma} = n_{Subst},$$

где *n_{Mask}* и *n_{Subst}* – показатели преломления маски и подложки.

Для максимального угла падения излучения в центре МФП через диафрагму следует:

$$\begin{cases} \frac{d+a}{2} = \frac{H}{\sqrt{\frac{1}{\left(\sin\alpha\right)^2} - 1}} + \frac{t_{Mask}}{\sqrt{\frac{1}{\left(\sin\beta\right)^2} - 1}} \approx \left(H + t_{Mask} / n_{Mask}\right) \sin\alpha \\ \Delta a = \frac{L}{\sqrt{\frac{1}{\left(\sin\alpha\right)^2} - 1}} + \frac{t_{Subst}}{\sqrt{\frac{1}{\left(\sin\gamma\right)^2} - 1}} \approx \left(L + t_{Subst} / n_{Subst}\right) \sin\alpha, \end{cases}$$

где $\sin \alpha$, $\sin \beta$, $\sin \gamma \ll 1$.

Решая систему уравнений, получаем условие подавления геометрического размытия:

$$\frac{\Delta a}{a/2} \approx \left(\frac{d}{a}+1\right) \frac{\left(L+t_{Subst}/n_{Subst}\right)}{\left(H+t_{Mask}/n_{Mask}\right)} \ll 1.$$

Откуда видно, что для подавления геометрического размытия необходимо уменьшать диаметр диафрагмы источника излучения *d* и увеличивать расстояние *H* от диафрагмы источника излучения до маски. Кроме этого, необходимо учитывать известное условие дифракционного размытия:

$$\frac{\lambda}{a^2} (L + t_{Subst} / n_{Subst}) << 1$$

Можно заключить, что для эффективного подавления дифракционного размытия необходимо уменьшать величину зазора *L* между непрозрачным рисунком и подложкой.

Предложенный метод оперативного получения распределения чувствительности по площади пикселя матричного фотоприёмника при помощи сканирующей маски с использованием открытой зондовой установки ускоренного тестирования МФП при температуре жидкого азота был опробован при создании экспериментальных и опытных образцов матричных фотоприемных устройств на основе антимонида индия. Однако предлагаемый метод получения распределения чувствительности по площади пикселя матричного фотоприёмника применим и к матричным фотоприемным устройствам на основе других полупроводниковых материалов с утоньшенными подложками (например, на основе структур с квантовыми ямами с подложкой GaAs, InGaAs с подложкой InP, AlGaN с подложкой из сапфира).

Для изготовления индиевой маски на кремнии с целью получения распределения чувствительности по площади пикселя матричного фотоприёмника вначале на пластину диаметром 60 мм из двухсторонне оптически полированного кремния марки КДБ12 напылялся слой индия толщиной 3,2 мкм. Далее стандартными фотолитографическими методами формировался рисунок на фоторезисте на основе фотошаблона для создания мезы 30×30 мкм каждого пикселя, используемого для изготовления фоточувствительной матрицы с шагом 40 мкм на основе InSb, и манипулированием микрозондов с микроподвижками удалялся индий из квадратных окошек размером 10×10 мкм с одинаковым шагом следования 170 мкм по горизонтали и вертикали и обшим количеством окошек равным 8×8 = 64 шт. После чего методом дисковой

резки из пластины с изготовленной маской вырезали прямоугольник большего размера, чем МФП вдоль линий, параллельных направлению расположения окошек в маске, и полученный образец маски отмывали от фоторезиста.

На рис. 2, а показаны измеренные форма окошек и их площадь. Учитывая погрешности изготовления маски, применялось выравнивание по интегральной чувствительности каждого окошка маски в пределах всех ближайших к окошку пикселей МФП (рис. 2, б). На рис. 2, г приведен рисунок интегрального распределения угла поворота расположения In-маски, где случайный поворот оказался в диапазоне от -4,5° до 1°, что позволило получить достаточно точное распределение чувствительности после нескольких попыток совмещения (рис. 4, а). Влияние геометрического разброса индиевой маски, изготовленной манипуляцией микрозондов с микроподвижками, на чувствительность, показано на рис. 2, в.



Рис. 2. Характеристики изготовленного образца индиевой маски: а – форма окошек и их площадь; б – интегральные чувствительности каждого окошка в пределах всех ближайших к окошку пикселей МФП; в – влияние разброса окошек, изготовленных манипуляцией микрозондов с микроподвижками, в случаях без коррекции разбросов маски, с коррекцией по площади и с коррекцией полной чувствительности окошек на точность определения чувствительности; г – интегральное распределение угла поворота расположения маски.

Из результатов сравнения трех видов обработки распределения чувствительности (без коррекции разбросов маски, с коррекцией по площади и с коррекцией полной чувствительности окошек) видно, что в последнем случае распределение чувствительности стало более равномерным. Таким образом, можно сделать вывод о необходимости улучшать точность изготовления сканирующей индиевой маски.

Для изготовления хром-никелевой маски на кремнии с целью получения распределения чувствительности по площади пикселя матричного фотоприёмника вначале, аналогично индиевой маске, на оптически полированный диск из сапфира диаметром 22 мм и толщиной 1 мм напылялся слой индия толщиной 1 мкм. Далее стандартными фотолитографическими методами формировался рисунок на фоторезисте на основе фотошаблона для создания мезы 30×30 мкм каждого пикселя, используемого для изготовления фоточувствительной матрицы с шагом 40 мкм на основе InSb и манипулированием микрозондов с микроподвижками удалялся индий из квадратных окошек размером 5×5 мкм с одинаковым шагом следования 170 мкм по горизонтали и вертикали и общим количеством окошек равным 8×8 = 64 шт. После этого изготовили фотошаблон стандартной операцией копировафотошаблонов, используя заготовку ния фотошаблона с нанесенным фоторезистом и индиевую маску на сапфировом диске. С помощью таким образом изготовленного фотошаблона стандартным фотолитографическим методом «взрыва» сформировали металлическую маску на пластине диаметром 60 мм из оптически двухсторонне полированного кремния марки КДБ12 с толщиной металлического слоя хрома 200А и никеля 1200А. После чего методом дисковой резки из пластины с изготовленной маской вырезали прямоугольник бо́льшего размера, чем МФП вдоль линий, направлению параллельных расположения окошек в маске.



Рис. 3. Характеристики изготовленного образца хром-никелевой маски: а – форма окошек и их площадь; б – интегральные чувствительности каждого окошка в пределах всех ближайших к окошку пикселей МФП; в – влияние разброса окошек в случаях без коррекции разбросов маски, с коррекцией по площади и с коррекцией полной чувствительности окошек на точность определения чувствительности; г – сравнение интегральных распределений площадей прозрачных областей индиевой и хром-никелевой масок.

На рис. 3, а показаны измеренные форма окошек (видны сглаженные и растравленные края в результате операции копирования фотошаблонов) и их площадь. Учитывая, аналогично индиевой маске, погрешности изготовления маски, применялось выравнивание по интегральной чувствительности каждого окошка маски в пределах всех ближайших к окошку пикселей (рис. 3, б). Из результатов сравнения трех видов обработки распределения чувствительности (без коррекции разбросов маски, с коррекцией по площади и с коррекцией полной чувствительности окошек) видно, что в последнем случае распределение чувствительности стало более равномерным (рис. 3, в). Откуда можно сделать вывод о необходимости улучшать точность изготовления сканирующей хром-никелевой маски. На рис. 3, г из сравнения интегральных распределений площадей прозрачных областей In и CrNi масок видно, что площадь CrNi масок в среднем в ~2 раза меньше In-масок, что соответствует средней величине стороны квадрата

CrNi маски 7,5 мкм, которая значительно меньше, чем у In-маски – 10 мкм.

Результаты применения метода измерения распределения чувствительности по площади пикселя матричного фотоприемника

Типичное трёхмерное представление распределения чувствительности по элементу с помощью индиевой маски показано на рис. 4, а на изображении для МФП с толщиной 7 мкм. С помощью хром-никелевой маски получено трёхмерное представление распределения чувствительности по элементу для МФП с толщиной 7 мкм (рис. 4, б). Характерной особенностью полученного распределения чувствительности является пирамидальность формы и квадратоподобный характер среза в горизонтальной плоскости, что соответствует плотной упаковке элементов в матричном фотоприёмнике, а именно, квадратной форме мезы изготовления МФП.



Рис. 4. Трёхмерное представление распределения чувствительности по площади пикселя матричного фотоприёмника на основе антимонида индия, полученного с помощью сканирующей маски: а – индиевой маски; б – хром-никелевой маски с отображением квадратного среза и пирамидальности формы распределения чувствительности.

Используя индиевую маску, были получены распределения чувствительности по оси ординат (рис. 5, а) и диагонали (рис. 5, δ) в зависимости от толщины фоточувствительного слоя, из которых видно, что дифракционное размытие Френеля существенно меньше распределения чувствительности при полученном значении зазора ~15 мкм, а при уменьшении

толщины менее 8 мкм взаимосвязь не превышает 5 %.

На рисунке 5, *в* приведены зависимости чувствительности и взаимосвязи, измеренной по методу 1.17 ГОСТ 17772-88 [10], от толщины фоточувствительного слоя в области ближней зоны 3×3 (квадраты) и в области дальней зоны 5×5 (треугольники). Видно, что при толщине менее 8 мкм ближняя взаимосвязь – менее 3,2 % и дальняя взаимосвязь – менее 0,8 %. При этом с увеличением толщины чувствительность в точке (круги) уменьшается из-за размытия. Аналогично на рисунке 5, c приведены зависимости чувствительности и взаимосвязи, измеренной по методу сканирующей маски от толщины фоточувствительного слоя в области ближней зоны 3×3 (квадраты) и в области дальней зоны 5×5 (треугольники). Видно, что при толщине менее 8 мкм ближняя взаимосвязь менее 3,9 % и дальняя взаимосвязь менее 0,25 %. При этом с увеличением толщины чувствительность в точке (круги) также уменьшается из-за размытия. Сравнение двух методов определения взаимосвязи показывает схожие результаты.



Рис. 5. Распределение чувствительности по оси пикселей (а) и по диагонали (б), а также взаимосвязь, по методу 1.17 ГОСТ 17772-88 [10] (в) и по распределению чувствительности (г) в зависимости от толщины фоточувствительного слоя.

Заключение

В результате проведенных исследований установлено, что влияние дефектов изготовления окошек сканирующей маски и величина зазора между маской и МФП являются наиболее значимыми факторами погрешности измерения распределения чувствительности по элементу. Проанализировано влияние зазора между сканирующей маской и МФП на геометрическое и дифракционное размытие и сделан вывод о необходимости его минимизации до достигнутого уровня неплоскостности утоньшенных структур МΦП ~1÷2 мкм. Из полученных распределений чувствительности выявлена пирамидальность формы и квадратоподобный характер среза в горизонтальной плоскости, что соответствует плотной упаковке элементов в матричном фотоприемнике, а именно квадратной форме изготовления мезы. Полученные распределения чувствительности и фотоэлектрической взаимосвязи для МФП с шагом 40 мкм на основе InSb в зависимости от толщины ФЧ слоя показали, что при толщине менее 10 мкм ближняя взаимосвязь в области 3×3 элемента не превышает 5 %, а дальняя взаимосвязь в области 5×5 элементов по вертикали и диагонали не превышает 0,5 %.

ЛИТЕРАТУРА

1. Болтарь К. О., Киселева Л. В., Лопухин А. А., Савостин А. В. Способ изготовления матричного фотоприемника (варианты). Патент № RU2460174C1 от 04.05.2011.

2. Shkedy L., Armon E., Avnon E., Ari Ben N., Brumer M., Jakobson C., Klipstein P. C., Lury Y., Magen O., *Milgrom B., Rosenstock T., Shiloah N., Shtrichman I. //* Proc. SPIE 2021. Vol. 11741, Infrared Technology and Applications XLVII, P. 117410W.

3. Болтарь К. О., Власов П. В., Лазарев П. С., Лопухин А. А., Чишко В. Ф. // Прикладная физика. 2020. № 1. С. 18.

4. Лопухин А. А., Болтарь К. О., Власов П. В., Ерошенков В. В., Чишко В. Ф., Кощавцев Н. Ф., Ларионов Н. А. // Успехи прикладной физики. 2020. Т. 8. № 5. С. 334.

5. ISO/TC42/WG18 «Resolution and spatial frequency response», International Organization for Standardization (ISO), 2000.

6. Delaunay Pierre-Yves, Nosho Brett Z., Gurga Alexander R., Terterian Sevag, Rajavel Rajesh D. // Infrared Technology and Applications XLIII, Proc. of SPIE. 2017. Vol. 10177. P. 101770T-1.

7. Itay Shtrichman et al. // Proceedings of SPIE. 2007. Vol. 6542. P. 288.

8. *Milton A. F., Barone F. R., Krue M. R. //* Optical Engineering. 1985. Vol. 24 (5). P. 855.

9. Болтарь К. О., Чишко В. Ф., Лопухин А. А., Власов П. В., Акимов В. М., Ефимов И. В., Ерошенков В. В., Киселева Л. В., Савостин А. В. «Открытая зондовая установка тестирования матричных фотоприёмников и способ ускоренного тестирования матричных фотоприемников» Патент № RU 2624623 C1 от 04.07.2017 Бюл. № 19.

10. ГОСТ 17772-88. Приемники излучения полупроводниковые фотоэлектрические и фотоприемные устройства. Методы измерения фотоэлектрических параметров и определения характеристик, 1988, Метод 1.17 определения коэффициента фотоэлектрической связи многоэлементного ФПУ. С. 27.

PACS: 07.07.Df, 07.57.-c, 81.05.Ea, 81.65.Rv

Distribution of sensitivity along the area of FPA pixel, limited by the diffraction limit of the scanning mask

A. A. Lopukhin, K. O. Boltar, V. M. Akimov, and M. A. Arbuzov

Orion R&P Association, JSC 9 Kosinskaya st., Moscow, 111538, Russia E-mail: orion@orion-ir.ru

Received October 02, 2021

Consideration is given to the distribution of sensitivity along the area of indium antimonide FPA pixel obtained with the aid of the nondestructive method of the scanning mask on the basis of the fast testing open probe installation.

Keywords: focal plane array, FPA, crosstalk, the scanning mask, open is probe installation, phototemplate, the diffraction.

DOI: 10.51368/1996-0948-2021-5-44-52

REFERENCES

1. K. O. Boltar, L. V. Kiseleva, A. A. Lopukhin, and A. V. Savostin, RF Patent No. RU2460174C1, April 5, 2011.

2. L. Shkedy, E. Armon, E. Avnon, N. Ben Ari, M. Brumer, C. Jakobson, P. C. Klipstein, Y. Lury, O. Magen, B. Milgrom, T. Rosenstock, N. Shiloah, I. Shtrichman Proc. SPIE **11741**, Infrared Technology and Applications XLVII, 117410W (April 12, 2021).

3. K. O. Boltar, P. V. Vlasov, P. S. Lazarev, A. A. Lopukhin, and V. F. Chishko, Applied Physics, No. 1, 18 (2020) [in Russian].

4. A. A. Lopukhin, K. O. Boltar, P. V. Vlasov, V. V. Eroshenkov, V. F. Chishko, N. F. Koschavtsev, and N. A. Larionov, Usp. Prikl. Fiz. 8 (5), 334 (2020).

5. ISO/TC42/WG18 "Resolution and spatial frequency response," International Organization for Standardization (ISO), 2000.

6. Pierre-Yves Delaunay, Brett Z. Nosho, Alexander R. Gurga, Sevag Terterian and Rajesh D. Rajavel Infrared Technology and Applications XLIII, Proc. of SPIE **10177**, 101770T-1 (2017).

7. Itay Shtrichman et al. Proceedings of SPIE. 6542, 288 (2007).

8. A. F. Milton, F. R. Barone, and M. R. Krue Optical Engineering 24 (5), 855 (September/October 1985).

9. K. O. Boltar, V. F. Chishko, A. A. Lopukhin, P. V. Vlasov, V. M. Akimov, I. V. Efimov, V. V. Eroshenkov, L. V. Kiseleva, and A. B. Savostin, RF Patent No. RU 2624623 C1, April 7, 2017

10. GOST 17772-88. Optical Detectors. FPA