

УДК 621.383.4

Фотоэлектрическая связь ультрафиолетового матричного фотоприемного устройства на основе гетероструктур AlGaIn

М.Е. Кононов, А.В. Полесский, К.А. Хамидуллин

Приведены результаты измерения фотоэлектрической связи матричного фотоприемного устройства ультрафиолетового диапазона спектра, созданного в ОАО «НПО «Орион». Фотоприемное устройство изготовлено на основе эпитаксиальных гетероструктур AlGaIn на подложке GaN с помощью разделения верхних эпитаксиальных слоев на мезаобласти. Приведена схема установки. Измерения показали нетривиальный результат – отрицательную величину коэффициента фотоэлектрической связи, то есть падение уровня темнового сигнала на некоторых фоточувствительных элементах, окружающих засвечиваемый элемент.

PACS: 42.79.Pw

Ключевые слова: AlGaIn, GaN, фотоэлектрическая связь, ультрафиолетовый диапазон, УФ диапазон, ультрафиолетовый фотоприемный модуль, матрица фоточувствительных элементов.

Введение

Фотоэлектрическая связь в многоэлементных фотоприемных устройствах выражается в появлении сигнала на фоточувствительном элементе при засветке соседнего. Величина фотоэлектрической связи определяется коэффициентом фотоэлектрической связи, а именно, отношением напряжения сигнала с необлученного элемента к напряжению фотосигнала с облученного элемента, определяемого на линейном участке энергетической характеристики [1]. Появление фотоэлектрической связи ведет к падению качества изображения, которое проявляется в ухудшении модуляционной передаточной функции (МПФ) [2, 3].

В ОАО «НПО «Орион» было разработано матричное фотоприемное устройство на основе гетероструктур AlGaIn/GaN формата 320×256 для ультрафиолетового диапазона спектра с размером фоточувствительного элемента 20 мкм и шагом 30 мкм [4], предназначенное для систем визуализации, пеленгации и селекции целей. Матрица фотодиодов была сформирована с помощью разделения верхних эпитаксиальных слоев на мезаобласти [5]. По сравнению с матрицами, полученными по планарной технологии, от матриц на основе мезаструктур можно ожидать низкое значение коэффициента фотоэлектрической связи.

Целью данной работы было исследование фотоэлектрической связи матричного фотоприемного устройства ультрафиолетового диапазона спектра.

Выбор метода измерения

На рис. 1 показана типовая структура матрицы, полученной по планарной технологии и мезатехнологии.

Измерения фотоэлектрической связи можно проводить различными методами. Наиболее простой и распространенный «классический» метод измерения фотоэлектрической связи, применяемый в России и за рубежом, требует наличия оптического зонда со специальной проекционной оптической системой, способной обеспечить засветку единичного фоточувствительного элемента. Применение данного метода показало его эффективность в ближнем ИК, видимом и УФ диапазонах. Причем его эффективность в УФ-диапазоне спектра наиболее высока, поскольку с уменьшением длины волны линейно уменьшается величина дифракционного пятна рассеяния [6].

Среди других методов стоит отметить метод экранирования соседних фоточувствительных площадок путем нанесения непрозрачной маски [7] и метод сканирования многоэлементных фотоприемных устройств световым пятном, размер которого превышает размер пикселя. Каждый из перечисленных методов имеет свои недостатки.

Основным недостатком метода экранирования является нанесение непрозрачной металлической маски на поверхность фоточувствительных элементов. Из-за того что маска наносится химическим способом, ее удаление с поверхности практически невозможно, поэтому дальнейшее использование данного фотоприемного устройства невозможно, а полученные в результате исследований результаты позволяют оценить лишь уровень коэффициента фотоэлектрической связи, обеспечиваемый технологией производства. При использовании данного метода наблюдается довольно сильная дифракция на отверстиях, которая приводит к засветке соседних элементов и, как следствие, к ошибкам измерений. К тому же метод пригоден для измерения только отдельных фоточувствительных элементов.

Основным недостатком метода сканирования многоэлементных фотоприемных устройств световым пятном, размер которого превышает размер фоточувствительного

Кононов Михаил Евгеньевич, инженер¹, магистрант².

Полесский Алексей Викторович, главный метролог¹.

Хамидуллин Камилль Алиевич, начальник отдела¹.

¹ОАО «НПО «Орион».

Россия, 111123, Москва, ш. Энтузиастов, 46 /2.

E-mail: orion@orion-ir.ru, kamil1986@list.ru

²Национальный исследовательский университет «МЭИ».

Россия, 111250, Москва, Красноказарменная ул., 14.

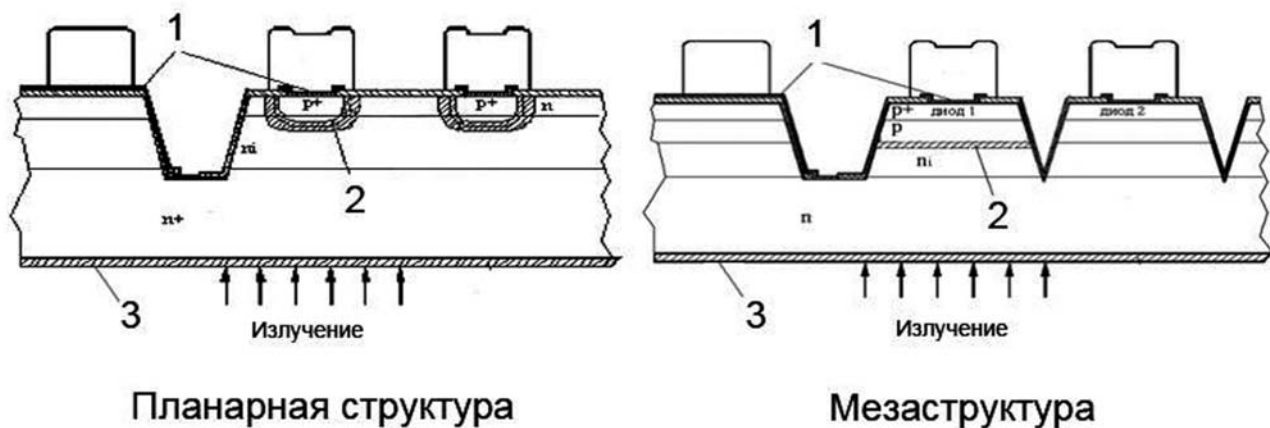


Рис. 1. Планарная структура и мезаструктура: 1 – металл; 2 – обедненная область; 3 – подложка.

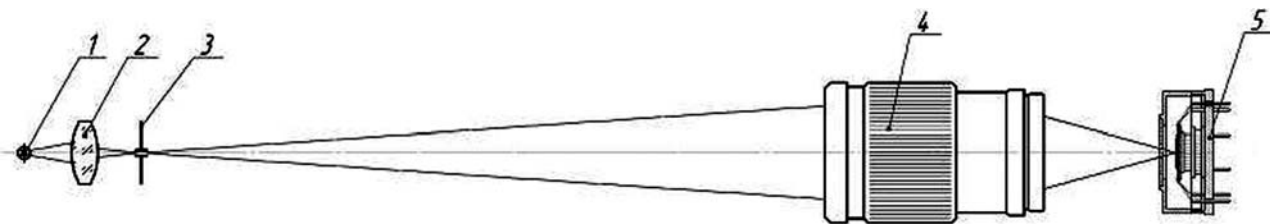


Рис. 2. Схема измерения фотоэлектрической связи УФ МФПУ: 1 – светодиод; 2 – конденсор; 3 – точечная диафрагма; 4 – оптический зонд; 5 – МФПУ.

элемента, является сложность его реализации, вызванная необходимостью применения прецизионных аттестованных оптико-механических компонентов и сложной математической обработкой первичных результатов измерений.

При проведении измерений фотоэлектрической связи матричного фотоприемного устройства на основе гетероструктур AlGaIn/GaN был использован классический метод измерения фотоэлектрической связи, схема которого приведена на рис. 2.

Измерительная установка

В качестве источника излучения использовался светодиод UVTOP355BL фирмы SETI, имеющий спектральный диапазон излучения 355–365 нм. Светодиод освещал точечную диафрагму диаметром 20 мкм. Оптический зонд формировал в плоскости фотоэлектрических элементов изображение точечной диафрагмы. Оптический зонд, используемый в установке, имеет следующие характеристики: фокусное расстояние 70 мм; относительное отверстие 1:2,5; спектральный диапазон 270–400 нм.

Для перемещения изображения диафрагмы с одного фотоэлектрического элемента на другой производились малые перемещения источника излучения относительно объектива.

Используемое матричное фотоприемное устройство являлось видимо-слепым и имело спектральный диапазон работы 295–370 нм. Считывание сигнала с матричного фотоприемного устройства производилось с помощью специального блока электронной обработки производства ФГУП ОКБ «Омега» и персонального компьютера.

Для расчета коэффициента фотоэлектрической связи было разработано программное обеспечение. Программа могла считать среднее значение сигналов по 1000 кадрам для каждого фотоэлектрического элемента при засветке от источника излучения и без нее, а затем вычитала одно из другого. Таким образом, устранялось влияние темнового «пьедестала» и шумов при расчете.

Фоновой засветки при проведении эксперимента в данном диапазоне не наблюдалось. Температурная стабилизация не проводилась, температура и давление в лаборатории соответствовали нормальным климатическим условиям.

По расчетам, качество используемого объектива позволяет обеспечивать измерение фотоэлектрической связи. Однако было выявлено несколько обстоятельств, из-за которых необходимо принимать меры к уменьшению изображения диафрагмы.

Во-первых, порядок типового значения коэффициента фотоэлектрической связи оказался сравним с погрешностью, вносимой несовершенством оптического зонда.

Во-вторых, реальное изображение диафрагмы всегда больше расчетного, что связано с погрешностями изготовления оптического зонда, неточностью его установки относительно диафрагмы и МФПУ, а также aberrациями и иными факторами [8].

В процессе измерения было произведено диафрагмирование объектива до значения относительного отверстия 1:8,5. Это позволило минимизировать влияние монохроматических aberrаций и рассеянного света, а использование светодиода с узким спектром помогло избежать полихроматических aberrаций.

Таким образом, при малых значениях относительного отверстия объектива его качество ограничено дифракционными явлениями [9]. С учетом вышесказанного, можно сделать вывод о том, что изображение диафрагмы является диском Эйри с достаточно большой точностью.

Геометрический размер диафрагмы мал и его можно не учитывать в расчетах.

Диаметр изображения точечной диафрагмы по уровню 83% энергии определяется по формуле:

$$d = \frac{2,44 \cdot \lambda \cdot f'}{D}$$

Расчетное значение – 7,5 мкм. Это означает, что в круг диаметром 7,5 мкм попадает 83% энергии падающего излучения.

Основные результаты

Была проведена серия измерений коэффициента фотоэлектрической связи разных фоточувствительных элементов.

Для определения уровня шумов, вызванных нестабильностью характеристик, было произведено пробное измерение без засветки. Программа вычитала один усредненный по 1000 измерений кадр без засветки из другого. Из результатов измерений стало ясно, что изменение сигнала в диапазоне ±10 отсчетов аналогово-цифрового преобразователя (АЦП) является погрешностью измерений, вызванной нестабильностью параметров матрицы.

Типовые результаты измерения коэффициент фотоэлектрической связи приведены на рис. 3.

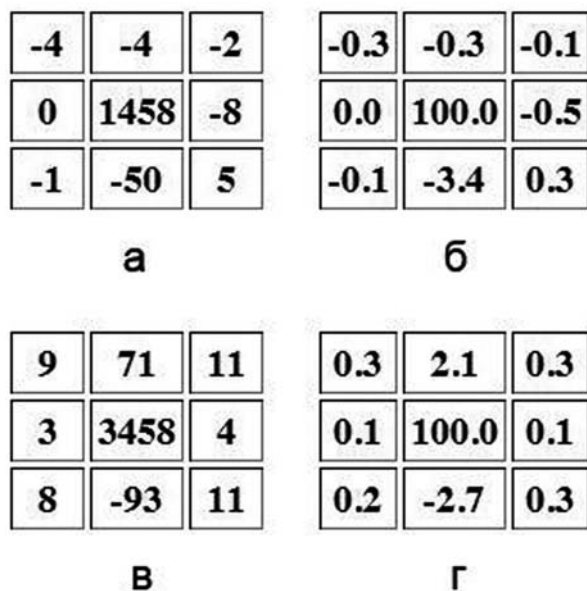


Рис. 3. Коэффициент фотоэлектрической связи: а – время накопления 2000 мкс, отсчеты АЦП; б – 2000 мкс, проценты; в – 3000 мкс, отсчеты АЦП; г – 3000 мкс, проценты.

В рассматриваемом случае при увеличении времени накопления и, как следствие, увеличении уровня сигнала на центральном фоточувствительном элементе, на

элементе с меньшей вертикальной координатой («верхнем» на рис. 3) происходило появление небольшой фотоэлектрической связи (рис. 3, в, г), коэффициент которой являлся положительной величиной, то есть происходило появление сигнала на «верхнем» элементе при засветке центрального.

В то же время на «нижнем» фоточувствительном элементе при всех уровнях сигнала наблюдалось снижение уровня темного «пьедестала», т.е. реализовывался отрицательный коэффициент фотоэлектрической связи.

В проведенной в дальнейшем серии измерений в большинстве случаев данный эффект наблюдался в «нижнем» фоточувствительном элементе относительно засвечиваемого.

Анализ показал, что отрицательная величина коэффициента фотоэлектрической связи не является ошибкой эксперимента.

Это явление нетривиально, поскольку не описано в литературе, представляет интерес и требует дальнейшего обсуждения.

Его можно объяснить взаимодействием ультрафиолетового излучения с мультиплексором, либо падением напряжения в подложке в области облученного фоточувствительного элемента, вызывающим снижение уровня темного «пьедестала» у соседних фоточувствительных элементов.

Заключение

В результате произведенной серии измерений коэффициента фотоэлектрической связи разработанного в ОАО «НПО «Орион» матричного фотоприемного устройства (на спектральный диапазон 295–370 нм, формата 320×256 на основе эпитаксиальных гетероструктур AlGaIn на подложке GaN, с разделением эпитаксиальных слоев на мезаобласти) можно сделать следующие выводы:

Проведенные измерения показали малую величину коэффициента фотоэлектрической связи, вполне соответствующую параметрам, ожидаемым от фоточувствительного элемента с разделением эпитаксиальных слоев на мезаобласти, вследствие чего можно говорить о высоком качестве изготовления матрицы фоточувствительных элементов.

Отрицательные величины фотоэлектрической связи (при засветке одного элемента на соседних наблюдалось падение электрического сигнала), вызванные снижением уровня темного «пьедестала», скорее всего вызваны особенностями работы мультиплексора, поскольку распределены несимметрично, и требуют отдельных исследований.

Стоит отметить, что наличие в матричном фотоприемном устройстве отрицательной фотоэлектрической связи создает эффект подчеркивания границ, приводящий к улучшению восприятия человеком оператором малоcontrastных объектов, поэтому довольно интересной представляется возможность создания матричных фотоприемных устройств с симметричным внешне управляемым отрицательным коэффициентом фотоэлектрической связи.

В рамках развития метода представляется перспективной замена тест-объекта в виде «точечной» диафрагмы на тест-объект в виде двумерного массива точечных диафрагм. В этом случае возрастет производительность

метода, однако и возрастут требования к качеству изображения оптического зонда – потребуется зонд с высоким качеством изображения по всей поверхности фотоприемного устройства и также появятся специфические требования на коэффициент увеличения проекционной системы и угол поворота массива точечных диафрагм относительно матрицы фоточувствительных элементов.

Литература

1. Приемники излучения полупроводниковые фотоэлектрические и фотоприемные устройства. Методы измерения фотоэлектрических параметров и определения характеристик, ГОСТ 17772, 1988.

2. *Estribeau M., Magnan P.* in Proc. SPIE Electronic Imaging (San Jose, United States, 2005).
3. *Полесский А.В., Соляков В.Н., Хамидуллин К.А.* // Труды 54-й международной конференции МФТИ. 2011, С. 121.
4. *Бурлаков И.Д., Болтарь К.О., Яковлева Н.И. и др.* // Успехи прикладной физики. 2013. Т. 1. № 3. С. 344.
5. *Болтарь К.О., Бурлаков И.Д., Филачев А.М. и др.* // Прикладная физика. 2013. № 6. С. 54.
6. *Борн М., Вольф Э.* Основы оптики. – М.: Наука, 1973.
7. *Estribeau M., Magnan P.*, in Proc. 12-th SPIE International Symposium Remote Sensing (19-22 September 2005, Bruges, Belgium).
8. *Демидов В.И., Колесова А.А., Полесский А.В. и др.* // Успехи прикладной физики. 2013. Т. 1. № 5. С. 625.
9. *Заказнов Н.П., Кирюшин С.И., Кузичев В.И.* Теория оптических систем. – М.: Машиностроение, 1992.

Работа выполнена по гранту Президента Российской Федерации НШ-2787.2014.9

Pixel crosstalk in ultraviolet focal plane array based on AlGa_N heterostructures

M. E. Kononov^{1,2}, A. V. Polesskiy¹, and K. A. Khamidullin¹

¹ Orion Research-and-Production Association
46/2 Enthusiasts highway, Moscow, 111123, Russia
E-mail: orion@orion-ir.ru, kamil1986@list.ru

² Moscow Power Engineering Institute
14 Krasnokazarmennaya str., Moscow, 111250, Russia

Received April 29, 2014

The results of pixel crosstalk measurement for focal plane array based on AlGa_N heterostructures are given. Focal plane array based on mesa photodiodes has been developed by RD&P Center “Orion”. The scheme of measurement stand and typical results are shown. The results enable us to assert reducing dark signal of some neighboring pixels – the negative coefficient of pixel crosstalk.

PACS: 42.79.Pw

Keywords: AlGa_N, GaN, pixel crosstalk, ultraviolet range, UV range, ultraviolet focal plane array, UV FPA.

References

1. *Radiation Semiconductor Detectors, GOST 17772* (USSR - Russia, 1988) [in Russian].
2. *M. Estribeau and P. Magnan*, in Proc. SPIE Electronic Imaging (San Jose, United States, 2005).
3. *A. V. Polesskiy, V. N. Solyakov, and K. A. Khamidullin*, in Proc. 54-th Intern. Conf. (MFTI, Russia, 2011), pp. 121-125 [in Russian].
4. *I. D. Burlakov, K. O. Boltar, N. I. Iakovleva, et al.*, Uspekhi Prikladnoi Fiziki **1**, 344 (2013).
5. *K. O. Boltar, I. D. Burlakov, A. M. Filachev, et al.*, Prikladnaya Fizika, No. 6, 54 (2013).
6. *M. Born and E. Wolf*, *Principles of Optics* (Cambridge University Press, 1999; Nauka, Moscow, 1973).
7. *M. Estribeau and P. Magnan*, in Proc. 12-th SPIE International Symposium Remote Sensing (19-22 September 2005, Bruges, Belgium).
8. *V. I. Demidov, A. A. Kolesova, A. V. Polesskiy, et al.*, Uspekhi Prikladnoi Fiziki **1**, 625 (2013).
9. *N. P. Zakaznov, S. I. Kiryushin, and V. I. Kuzichev*, *Theory of Optical Systems* (Mashinostroenie, Moscow, 1992) [in Russian].