

Рис. 4. Зависимость эффективной длины диффузии электронов (L_e) от граничной длины волны в МФП на основе КРТ:
 ◆ — измерения; — — моделирование

Исследования показали, что эффективная диффузионная длина для измеренных образцов изменялась в пределах 12—18 мкм, что обеспечивает высокие фотоэлектрические характеристики МФП составов $x = 0,2$ на ЭС КРТ с толщиной слоя КРТ ~ 15 мкм. Исследования также выявили слабую зависимость длины диффузии неосновных носителей заряда в p -области — электронов от граничной длины волны по уровню 0,5 фотодиодов в диапазоне 10—12 мкм.

Измеренная таким образом эффективная длина диффузии L_e имеет весьма отдаленное отношение к длине диффузии в объемном материале КРТ, так как помимо рекомбинации носителей в объеме ЭС КРТ имеется рекомбинация на границе раздела ЭС КРТ—подложка и ЭС КРТ—воздух. Эффективная длина диффузии помимо длины диффузии в объеме зависит от скоростей поверхностной рекомбинации на границах ЭС КРТ и толщины эпитаксиального слоя. Однако именно эта эффективная длина диффузии определяет взаимосвязь фоточувствительных элементов в МФП.

Л и т е р а т у р а

1. Dang K. V., Kauffman L., Derzko Z. I. // SPIE. 1992. V. 1686. P. 125.
2. Уайт М. Г. Полупроводниковые формирователи сигналов изображения. — М.: Мир. 1979. Ч. VI. Пар. 4.3. С. 368.
3. Boltar K. O., Yakovleva N. I. Sensitive element dimension measurements in focal plane arrays// Proceedings of SPIE. 1998. V. 3819. P. 40.
4. Болтарь К. О., Яковлева Н. И. Исследование фотоэлектрических размеров элементов в матричных ИК-фото-приемниках// Прикладная физика. 1999. Вып. 2. С. 45—49.
5. Holst Gerald C. Testing and evaluation of infrared imaging systems. JCD Publishing Co. — Maitland, Florida 32751, 1993.

Статья поступила в редакцию 23 ноября 2004 г.

Diffusion length in p -type HgCdTe epitaxial layers determination

K. O. Boltar, N. I. Yakovleva

ORION Research-and-Production Association, Moscow, Russia

Charge carriers diffusion length needs to be exactly calculated in p -type HgCdTe epitaxial layers to design FPA with small crosstalk and high performance. The mathematical model and the computing program to determine the minority carriers diffusion length from experimental data of photodiode spatial signal response versus the optical spot movement along the pixel have been developed. The correlation diffusion length data with other methods data has been analyzed.

УДК 621.383

Эпитаксиальный SPRITE-фотоприемник

А. А. Алиев, Э. К. Гусейнов, А. К. Мамедов

Институт физики НАН Азербайджана, Баку, Республика Азербайджана

Предложены конструкция и технология изготовления SPRITE-фотоприемника на основе эпитаксиальных пленок $Cd_xHg_{1-x}Te$, выращенных в заранее созданных канавках подложки. Показаны преимущества конструкции по сравнению с существующими как в технологическом, так и в конструкторском аспекте.

Задачи инфракрасной (ИК) техники, в частности тепловидения, постоянно находятся в центре внимания ученых, создающих различные системы и элементы оптоэлектроники, среди которых немаловажное значение имеют детекторы ИК-излучения. Одним из направлений разрабатываемых ИК-детекторов являются SPRITE-фо-

топриемники (аббревиатура — от английского Signal Processing In The Element).

Фотоприемники типа SPRITE представляют собой фоторезистор с тремя электродами, два из которых обеспечивают нагрузочный ток, а третий (потенциальный) — съем сигнала (рис. 1, а). Прикладываемое к

фоторезистору напряжение подбирается таким, чтобы время дрейфа фотогенерированных носителей было равно или меньше времени их жизни. Скорость сканирования v_s , фокусируемого на фоторезистор изображения, соответствует скорости дрейфа пакета фотогенерированных носителей, а плотность фотоносителей в месте изображения щели зависит от координаты x . При правильно выбранной скорости сканирования изображения, сигнал, снимаемый с потенциального электрода, определяется световым потоком в месте изображения щели, проинтегрированный за время, равное времени жизни генерированных носителей заряда τ . Так как τ значительно больше времени, приходящегося на один элемент разложения в линейке дискретных фотоприемников, что эквивалентно времени пролета области считывания τ_a (один элемент разложения соответствует площади между потенциальным и тянущим электродами), то происходит усиление сигнала в τ/τ_a раз. Так как шум не коррелирован, то он усиливается в $(\tau/\tau_a)^{1/2}$ раза.

Таким образом, один SPRITE-фотоприемник с предусилителем заменяет линейку дискретных приемников с последовательным сканированием, совместно с предусилителями и схемами временной задержки и интегрирования заряда [1].

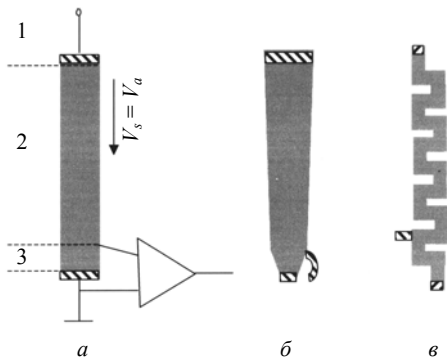


Рис. 1. SPRITE-детектор:
 а — общая схема: 1 — токовый контакт; 2 — область дрейфа; 3 — область считывания;
 б — с рупорообразной геометрией области считывания;
 в — типа меандр

Основные фотоэлектрические параметры SPRITE-фотоприемников для малых пространственных частот определяются следующими выражениями:

- чувствительность

$$R_{\lambda} = \frac{\eta \tau E_b l}{h\nu W^2 2t n} \left[1 - \exp\left(-\frac{L}{\mu_a E_b \tau}\right) \right]; \quad (1)$$

- приведенная обнаружительная способность для длинной полоски ($L \gg \mu_a E_b \tau$) и VLLP-режима

$$D^* = \frac{\eta^{1/2}}{2h\nu} \left(\frac{1}{\Phi_b W} \right)^{1/2} \left[1 - \frac{\tau}{\tau_a} \left\{ 1 - \exp\left(-\frac{\tau_a}{\tau}\right) \right\} \right]^{-1/2},$$

где η — квантовый выход;
 E_b — приложенное поле;
 l — длина области считывания;
 W, t — ширина и толщина чувствительного элемента, соответственно;

n — концентрация равновесных носителей заряда;
 μ_a — амбиполярная подвижность носителей заряда;
 L — длина области дрейфа;
 Φ_b — фоновый поток излучения.

Усилия разработчиков в основном направлены на создание конструкции SPRITE-фотоприемников, позволяющих улучшить температурное и пространственное разрешение тепловизионных систем. Температурное разрешение улучшается за счет увеличения длины линеек либо изготовлением двухмерных матриц; пространственное разрешение — выражается модуляционной-передаточной функцией

$$MTF = \frac{1}{1 + K_s^2 \cdot Q_a^2} \cdot \frac{2 \cdot \sin\left(\frac{K_s \cdot l}{2}\right)}{K_s \cdot l},$$

где K_s — пространственная частота изображения;

Q_a — длина амбиполярной диффузии; определяется диффузионным расплыванием пакета неравновесных носителей и пространственным усреднением в зоне считывания.

Из приведенных выражений следует, что для изготовления таких детекторов требуется материал, обладающий значительным временем жизни и малой диффузионной длиной неосновных носителей. С этой точки зрения наиболее подходящим является $n\text{-Cd}_x\text{Hg}_{1-x}\text{Te}$.

Известен ряд конструкций приборов на основе этого материала, одна из которых имеет рупорообразную геометрию считывающей области и конусную геометрию области дрейфа (см. рис. 1, б), что значительно улучшило основные параметры фотоприемника [2]. Рупорообразная геометрия области считывания позволила в значительной мере преодолеть недостаток конструкции, связанный с неоднородностью электрического поля в объеме, что приводило к значительному разбросу времени пролета носителей, дрейфующих к области считывания. Кроме того, более высокая напряженность электрического поля у отрицательного электрода уменьшила задержку рекомбинации неосновных носителей вблизи контакта. Однако даже в этой конструкции не удалось полностью преодолеть указанные недостатки.

Носитель, дрейфующий вблизи края элемента, проходит больший путь под действием более слабого поля, чем носитель, дрейфующий в центральной части. Ввиду малой ширины отрицательного электрода даже более высокая напряженность электрического поля не позволила полностью преодолеть аккумуляцию носителей на контактах, приводящую к увеличению времени накопления и, следовательно, временному размыванию изображения. Точечное расположение считывающего контакта с одной стороны элемента приводит к потерям полезного сигнала от носителей, дрейфующих на дальней стороне элемента.

Перечисленных выше недостатков лишена конструкция чувствительного элемента в виде меандра (см. рис. 1, в). Такая конструкция также привела к улучшению импульсной функции, однако в ней ввиду малой ширины линейки (около 15 мкм) весьма существенное

влияние на параметры оказывает рекомбинация носителей на гранях, уменьшающая время жизни носителей.

Хотя современные технологии позволили частично преодолеть этот недостаток, наличие зазоров между полосками приводит к потерям части светового потока. Для того чтобы обеспечить равномерную генерацию фотоносителей по толщине и более высокую чувствительность, чувствительные элементы изготавливаются толщиной ~ 10 мкм, что предъявляет высокие требования к качеству поверхности.

К технологическим трудностям для всех перечисленных конструкций можно также отнести необходимость изготовления контактов со спуском, расщепление области считывания для изготовления потенциального и тянущего контактов, проблему разводки токоведущих дорожек при изготовлении многоэлементных линеек и матриц. Высокие требования предъявляются и по однородности исходных объемных кристаллов.

Достигнутый в последние годы прогресс эпитаксиальных технологий позволил получать эпитаксиальные слои $\text{Cd}_x\text{Hg}_{1-x}\text{Te}$ с достаточно низкой концентрацией $\sim 10^{14}$ см^{-3} и высоким временем жизни неосновных носителей $\sim 10^{-6}$ с. Преимущество эпитаксиальных пленок состоит в их высокой однородности. В то же время такие пленки обладают рядом особенностей, связанных с наличием градиента ширины запрещенной зоны по толщине, приводящей к возникновению варизонного поля, прижимающего неосновные носители к стороне с меньшим E_g .

Ранее нами была предложена конструкция матрицы фотоприемников МДП [3] на основе эпитаксиальных слоев $\text{Cd}_x\text{Hg}_{1-x}\text{Te}$, выращенных в канавках, заранее созданных в подложке, с дальнейшим использованием подложки в качестве контактного раstra и межсоединений элементов матрицы. Использование аналогичной конструкции для изготовления SPRITE-фотоприемников позволяет избежать ряд технологических сложностей и конструктивных недостатков, указанных выше.

На рис. 2 представлена конструкция SPRITE-фотоприемника на базе эпитаксиальных слоев $\text{Cd}_x\text{Hg}_{1-x}\text{Te}$, а на рис. 3 — последовательность технологических операций при изготовлении указанного фотоприемника. В подложке одним из известных способов травления или резки создаются канавки глубиной до 20 мкм, шириной 65 мкм и длиной 700—2000 мкм с зазором не более 10 мкм (см. рис. 3, а). Затем на подложке выращиваются эпитаксиальные слои (см. рис. 3, б). Эпитаксиальный слой, выросший вне канавок на поверхности подложки, удаляется, и в результате получается плоскость с рядом полосок эпитаксиальных пленок $\text{Cd}_x\text{Hg}_{1-x}\text{Te}$, окруженных материалом подложки (см. рис. 3, в). Далее напылением либо электрохимическим осаждением на концы этих полосок наносится металлизация для токовых контактов и подводящие к ним токоведущие дорожки (см. рис. 3, г). На область считывания и часть токоведущей дорожки тянущего контакта наносится тонкий слой диэлектрика, после чего формируется металлизация считывающих контактов и их токоведущие дорожки, полностью закрывающие область считывания и далее проходящие по покрытой диэлектриком токоведущей дорожке тянущего контакта, а также все контакт-

ные площадки для подсоединения выводов блока элементов (см. рис. 3, д).

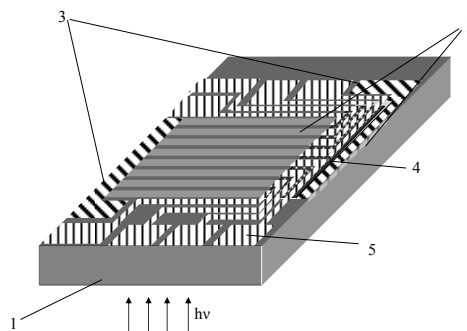


Рис. 2. Общий вид эпитаксиального SPRITE-детектора: 1 — подложка; 2 — эпитаксиальный слой; 3 — токовые контакты; 4 — слой диэлектрика; 5 — считывающие контакты

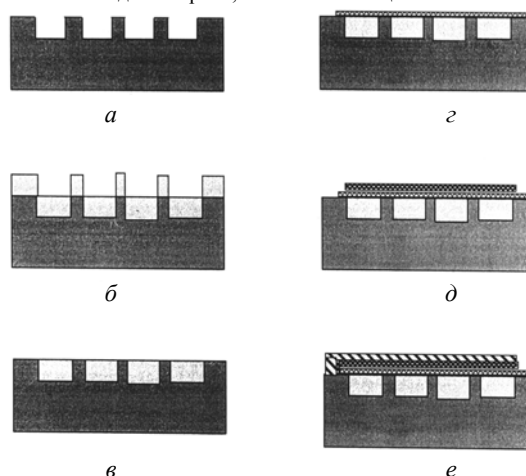


Рис. 3. Схема технологических процессов изготовления эпитаксиального SPRITE-детектора

Таким образом, в данной конструкции успешно решаются указанные выше технологические проблемы, связанные с изготовлением блока SPRITE-фотоприемников по традиционной планарной технологии на основе объемных кристаллов.

Рассмотрим физические аспекты, позволяющие предложенной конструкции в значительной степени преодолеть конструктивные недостатки традиционных SPRITE-фотоприемников.

Так как эпитаксиальные пленки выращиваются в канавках в идентичных условиях на однородной подложке, то электрофизические параметры, такие как концентрация носителей, их подвижность, электропроводность, время жизни и диффузионная длина неравновесных носителей для всех полосок, практически одинаковы.

В таком случае прикладываемое к каждому элементу напряжение, необходимое для согласования времени пролета носителей со скоростью сканирования, также будет одинаковым. Следовательно, можно подключить токовые контакты всех полосок параллельно к одному источнику питания. Это позволит уменьшить количество контактов до $(N+2)$ вместо $3N$ для объемных фотоприемников, где N — количество чувствительных эле-

ментов в блоке, сделать разводку только потенциальных выводов, что значительно облегчит дальнейшую коммутацию фотоприемника. Кроме того, плоская, без зазоров, поверхность предложенной конструкции позволяет без проблем произвести стыковку с мультисором.

В наиболее оптимальных из известных конструкций SPRITE-фотоприемников на объемных кристаллах, имеющих рупорообразную геометрию области считывания, разброс времени пролета носителей, генерированных на краю и середине элемента, достигает 110—130 мкс, что связано с геометрией элемента. В предложенной конструкции область считывания имеет форму квадрата, это приводит к одинаковому для носителей, дрейфующих на периферии и в середине элемента, пути до тянущего контакта, что приводит к равному времени пролета и одновременной их регистрации. Большая ширина контакта препятствует сильной аккумуляции носителей в области считывания, улучшая разрешающую способность. Наибольшая разница во времени регистрации в известной конструкции наблюдается для носителей, проходящих вдали от потенциального контакта. В нашем случае последний наносится на всю ширину элемента, приводя к одновременной регистрации носителей, дрейфующих по всей ширине элемента, что недостижимо при изготовлении расщепленных контактов.

В эпитаксиальных пленках в процессе их роста содержание кадмия от подложки по толщине плавно изменяется от теллурида кадмия до состава на поверхности. При этом возникает варизонное поле, которое действует только на неосновные носители и прижимает их к более узкозонной части.

Таким образом, пакет носителей генерированных излучением, не расплывается по толще кристалла, а направляется к поверхности, на которую нанесены контакты, и дрейфует в узкой приповерхностной области пленки, что также уменьшает размывание пакета носителей. В предложенной конструкции эпитаксиальные пленки выращиваются в канавках, т. е. растут от трех стенок, следовательно, и по ширине элемента также существует варизонное поле, которое отталкивает носители от граней полоски, способствуя уменьшению влияния боковых поверхностей, являющихся источником поверхностной рекомбинации.

Кроме того, такая конструкция улучшает отвод Джоулева тепла от элементов, соответственно, они могут работать при более высоких электрических полях. Как видно из формулы (1), чувствительность обратно пропорциональна толщине элемента. По этой причине обычно толщина элемента составляет не более 10 мкм.

В нашем случае наличие варизонного поля позволяет говорить об эффективной толщине элемента. Так, при обычной для дырок подвижности $500 \text{ см}^2/\text{В} \cdot \text{с}$ и величине встроенного поля порядка $100 \text{ В}/\text{см}$ носитель преодолевает расстояние 10 мкм за время порядка 20 нс и оказывается в приповерхностной области. Практически можно считать, что носители собираются встроенным полем в канале, значительно меньшем, чем площадь сечения пленки, где и происходит их дрейф.

Оценка, проведенная для приведенных выше размеров элемента, показывает, что эффективная ширина уменьшается до 50 мкм , а толщина вдвое. Причем это действительно для механизма дрейфа, а при фотогенерации работает вся ширина элемента. Это позволяет использовать более толстые слои без потерь чувствительности, и даже наоборот — лучше использовать лучистый поток. При засветке с широкозонной стороны можно расширить спектральный диапазон фотоприемника. В [4] было показано, что при нелинейном изменении ширины запрещенной зоны по толщине пленки можно получить широкую спектральную характеристику, практически перекрывающую весь диапазон между максимальной и минимальной шириной запрещенной зоны пленки. В работе [5] показано, что изменение ширины запрещенной зоны в эпитаксиальных пленках $\text{Cd}_x\text{Hg}_{1-x}\text{Te}$, выращенных методом ЖФЭ, можно аппроксимировать тремя участками с разными наклонами. Причем первая область с большой крутизной очень мала и приходится на широкозонную часть, вторая область начинается примерно в районе составов порядка $0,5$, что соответствует длине волны 2 мкм , а третья приходится на область составов меньше $0,25$.

Таким образом, имеется реальная возможность перекрыть спектральный диапазон $2\text{—}14 \text{ мкм}$ одним фотоприемником.

Л и т е р а т у р а

1. Elliott C. T., Day D., Wilson D. J.// Applied Physics, 1982. V. 22. P. 31—42.
2. Elliott C. T.// Proc. SPIE 1038. 1988. P. 2—8.
3. Aliyev A. A., Mamedov K., Huseynov E. K. and etc.// Azerbaijan Republic patent I 2000 0216, 2000.
4. Kudinov V. A., Peka G. P., Smolyar A. N.// Ukr. Phis. Jour. 1989. V. 34. P. 742—745.
5. Aliyev A. A., Mamedov K., Huseynov E. K. and etc.// Proc SPIE. 2000. V. 4340. P. 128—132.

Статья поступила в редакцию 23 ноября 2004 г.

Epitaxial SPRITE-photodetector

A. A. Aliyev, E. K. Husseynov, A. K. Mamedov
Institute of Physics NAS of Azerbaijan, Baku, Republic of Azerbaijan

The design and a manufacturing process of SPRITE-photodetectors on the basis of the $Cd_xHg_{1-x}Te$ epilayers, growth in beforehand created furrows of the substrate is offered. Advantages of the offered design are shown in comparison with existing both in technological, and in design aspects.