

УДК 621.384.326.23

Режим ускоренного опроса в смотрящих ИК-матрицах с коммутирующими $p-n$ -переходами

В. В. Осипов, А. Ю. Селяков

Государственное унитарное предприятие «НПО «Орион», Москва, Россия

Проанализированы избыточные шумы в смотрящих ИК-матрицах с коммутирующими $p-n$ -переходами, связанные с параллельностью процессов накопления и считывания фотосигнала. Показано, что рассматриваемые избыточные шумы приводят к ухудшению пороговых характеристик таких матриц в VLIP-режиме в $\sqrt{2}$ раз по сравнению с абсолютным теоретическим пределом. Предложен и проанализирован метод обработки фотосигнала — метод ускоренного опроса, позволяющий подавить эти избыточные шумы. Предложены архитектурные решения, с помощью которых можно реализовать метод ускоренного опроса без ужесточения требований к шумам устройства считывания фотосигнала и без уменьшения формата матрицы, работающей в VLIP-режиме, а также значительно сократить количество устройств считывания фотосигнала.

В работах [1–5] предложены планарные и гибридные смотрящие ИК-матрицы нового типа — матрицы с коммутирующими $p-n$ -переходами, рассмотрена физика их работы и проанализированы фотоэлектрические и пороговые характеристики, а также представлены результаты экспериментального исследования таких планарных матриц на основе InSb. В этих работах показано, что матрицы с коммутирующими $p-n$ -переходами могут обладать уникальными параметрами. Так, в случае использования в гибридных матрицах накопительных емкостей на основе тонких слоев TiO_2 время накопления фотосигнала может достигать величины порядка времени кадра в стандартном телевизионном режиме для среднего ИК-диапазона и величины порядка сотен микросекунд — для дальнего. При этом VLIP-режим в матрице среднего ИК-диапазона реализуется при формате матрицы 1024×1024 элементов, а в матрице длинноволнового ИК-диапазона — при формате 256×256 элементов.

Однако измеренные пороговые характеристики планарной матрицы на основе InSb, работающей в VLIP-режиме, оказались несколько ниже абсолютного теоретического предела [1]. Это явление может быть обусловлено избыточными шумами, являющимися следствием параллельности процессов накопления и считывания фотосигнала в матрицах с такой архитектурой. В данной статье проанализирован механизм избыточных шумов и предложен метод обработки фотосигнала — метод ускоренного опроса, позволяющий подавить такие шумы, а также рассмотрены различные варианты архитектуры матрицы, позволяющие реализовать этот метод.

Механизм избыточного шума

Для определенности будем рассматривать гибридную матрицу на основе HgCdTe [4, 5]. Гибридная матрица состоит из матрицы фоточувствительных $p-n$ -переходов и матрицы накопительных элементов, соединенных между собой посредством индиевых столбиков. Каждая ячейка рассматриваемой матрицы состоит из одного фоточувствительного $p-n$ -перехода и двух плоских конденсаторов емкостью C_1 и C_2 . Эквивалентные схемы матрицы в ре-

жиме накопления и считывания фотосигнала изображены на рис. 1. Все электроды 1 — верхние электроды каждого из плоских конденсаторов C_1 , принадлежащих одному столбцу матрицы накопительных элементов, соединены между собой шинами Y_i , а все электроды 2 — верхние электроды каждого из плоских конденсаторов C_2 , принадлежащих одной строке этой матрицы, соединены между собой шинами X_j , изолированными от шин Y_i . Каждая из шин X_j соединена с инвертирующим входом соответствующего операционного усилителя, который работает в режиме усилителя заряда и поддерживает напряжение, близкое к нулю на каждой шине X_j . Нижний электрод конденсаторов C_1 и C_2 , образующих одну ячейку матрицы накопительных емкостей, является общим и соединен с n^+ -областью фоточувствительного n^+ - p -перехода посредством индиевого столбика [4, 5]. Подложка матрицы фоточувствительных n^+ - p -переходов (слой полупроводника p -типа) заземлена, т. е. на ней поддерживается напряжение, равное нулю.

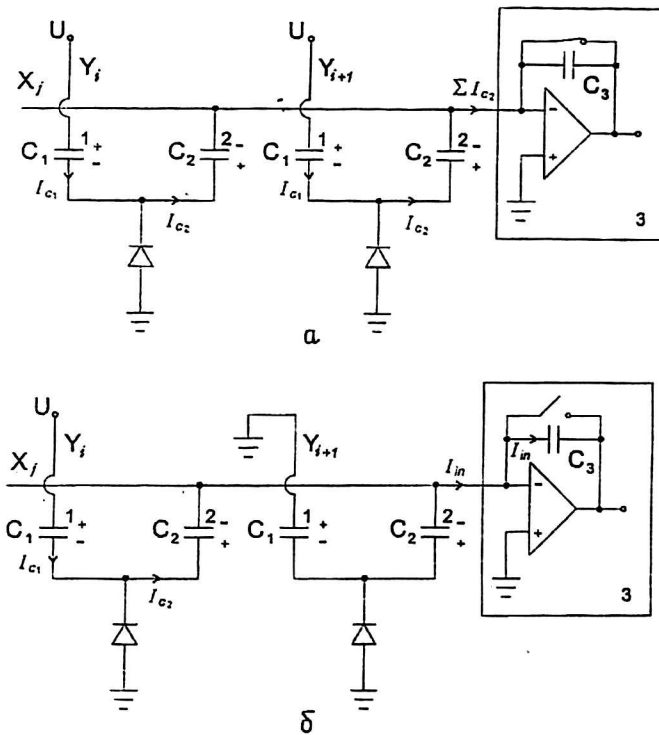


Рис. 1. Эквивалентная схема матрицы в режиме накопления (а) и в режиме считывания (б):
 1 — электрод ячейки матрицы накопительных емкостей, соединенный с шиной столбца Y_i ;
 2 — электрод ячейки матрицы накопительных емкостей, соединенный с шиной строки X_j ;
 3 — операционный усилитель, в котором ключ в цепи обратной связи замкнут в режиме накопления и разомкнут в режиме считывания; C_3 — емкость в цепи обратной связи;
 U — напряжение, подаваемое на столбец, в режиме накопления. Знаками “+” и “-” обозначены знаки зарядов, возникающих на соответствующих обкладках конденсаторов C_1 и C_2 ; I_{C_1} , I_{C_2} — токи смещения, протекающие через конденсаторы C_1 и C_2 , соответственно; I_{in} — ток, протекающий в цепи обратной связи при опросе выбранной $(i + 1; j)$ -й ячейки и обусловленный процессами накопления в остальных ячейках строки

Таким образом, конденсатор C_2 фактически соединен параллельно с n^+ - p -переходом, так как электрод 2 соединен с виртуальным нулем на входе операционного усилителя (см. рис. 1).

В работах [4, 5] отмечено, что накопление фотосигнала происходит непрерывно и одновременно на всех ячейках данной матрицы, а считывание происходит одновременно со всех ячеек, принадлежащих только одному из ее столбцов, например i -му (см. рис. 1, б). При этом все столбцы опрашиваются за время накопления фотосигнала. В начальный момент режима накопления на все шины Y_i (см. рис. 1, а), т. е. на все электроды 1 подается напряжение $U > 0$. Это напряжение практически мгновенно перераспределится между емкостью C_1 и емкостью параллельно соединенных p - n -перехода и конденсатора C_2 . В результате p - n -переход сместится в обратном направлении, на электроде 1 возникнет положительный заряд, а на электроде 2 — отрицательный.

Под действием фото- и тепловой генерации в обратносмещенном n^+ - p -переходе генерируются электронно-дырочные пары. В результате фототока и темнового p - n -перехода происходят разрядка его емкости и изменение напряжений на емкостях C_1 и C_2 . При этом абсолютная величина напряжения на емкости C_1 увеличивается, а на C_2 — уменьшается, и чем больше фотонов попадает на p - n -переход, тем сильнее изменение напряжений на емкостях C_1 и C_2 в данной ячейке. Изменение заряда конденсатора C_2 , которое зависит от интенсивности падающего излучения, является мерой величины фотосигнала в рассматриваемой матрице. Отметим, что в процессе накопления тока I_{C_2} — токи перезарядки емкостей C_2 каждой ячейки, принадлежащих j -й строке, протекают через шину строки X_j и замкнутый ключ в цепи обратной связи зарядового усилителя (см. рис. 1, а). При этом потенциал на каждой шине строки близок к нулю, и поэтому процессы накопления фотосигнала в различных ячейках происходят независимо друг от друга.

Иная ситуация реализуется в процессе считывания накопленного фотосигнала. Действительно, в этом случае необходимо разомкнуть ключи в цепях обратной связи зарядовых усилителей и заземлить шину выбранного столбца Y_i , с которого считывается фотосигнал. При заземлении электрода 1 опрашиваемой ячейки происходит подключение напряжения U_1 емкости C_1 к p - n -переходу. В результате чего p - n -переход, который и после воздействия излучения слабо смещен в обратном направлении, переключается в прямом направлении напряжением U_1 порядка нескольких вольт. Это приведет к быстрой разрядке конденсатора C_1 через прямосмещенный p - n -переход и установлению на нем напряжения, близкого к нулю. Одновременно с разрядкой конденсатора C_1 начинается разрядка конденсатора C_2 через прямосмещенный p - n -переход и зарядовый усилитель, точнее через емкость C_3 в цепи обратной связи операционного усилителя (см. рис. 1, б).

Из рис. 1, б видно, что при считывании накопленного заряда с некоторой i -й ячейки j -й строки матрицы через цепь обратной связи j -го зарядового усилителя и шину строки X_j кроме тока разрядки емкости C_2 опрашиваемой i -й ячейки протекает также ток I_{in} , связанный с процессами накопления в остальных ячейках строки. Этот ток вносит дополнительные флуктуации и тем самым ухудшает пороговые характеристики рассматриваемой матрицы. Величина дополнительного тока I_{in} равна

$$I_{in} = \sum_{i=1}^{m-1} I_{C_2}, \quad (1)$$

где m — число ячеек в строке матрицы, подключенных к одному зарядовому усилителю, а ток I_{C_2} дается выражением

$$I_{C_2} = \frac{\partial}{\partial t} C_2 V(t). \quad (2)$$

Здесь $V(t)$ — напряжение на фоточувствительном p — n -переходе. В работах [4, 5] показано, что уравнение, описывающее процесс накопления заряда в ячейке рассматриваемой матрицы, в случае, когда фоновый ток много больше темнового, имеет вид

$$(C_1 + C_2) \frac{\partial V(t)}{\partial t} = q\eta(J_b + J_s)A, \quad (3)$$

где q — заряд электрона;

η — квантовая эффективность поглощения ИК-излучения;

A — площадь фоточувствительного p — n -перехода;

J_b и J_s — плотности потока фотонов сигнального и фонового излучения, соответственно.

Отметим, что в случае больших фонов накопление фотосигнала в планарной матрице на основе InSb также описывается уравнением (3) с той лишь разницей, что под величиной A следует понимать часть площади p — n -перехода, не закрытую непрозрачными электродами [1].

Рассмотрим случай, когда фоновый поток много больше сигнального ($J_b \gg J_s$). В этом случае, принимая во внимание, что $m \gg 1$, из уравнений (1)—(3) найдем:

$$I_{in} = m I_{C_2} = q\eta_{eff} A J_b m, \quad (4)$$

где $\eta_{eff} = \eta C_2 / (C_1 + C_2)$.

Из уравнения (4) следует, что в рассматриваемом случае ток I_{in} и его флуктуации определяются фоновым излучением.

Таким образом, при считывании накопленного фотосигнала на емкости в цепи обратной связи зарядового усилителя кроме заряда емкости C_2 опрашиваемой ячейки будет накоплен дополнительный заряд $Q_{\Sigma} = I_{in} t_{dc}$, где t_{dc} — время считывания фотосигнала.

Поскольку все ячейки должны быть опрошены за время накопления фотосигнала t_{in} , то в случае, когда $t_{in}^{max} \geq T_f$, где T_f — время кадра, максимальное время считывания равно $t_{dc}^{max} = T_f / m$ (при $t_{in}^{max} < T_f$ время считывания есть $t_{dc}^{max} = t_{in} / m$). Согласно (4) в случае, когда $t_{dc} = t_{dc}^{max} = T_f / m$ дополнительный заряд Q_{Σ} равен:

$$Q_{\Sigma} = q\eta_{eff} A J_b T_f. \quad (5)$$

Из уравнений (2) и (3) следует, что в случае, когда скорость фоновой фотогенерации превышает скорости сигнальной и темновой генерации, заряд, фотогенерированный фоновым излучением и накопленный за время кадра в ячейке матрицы на емкости C_2 , равен $Q_{C_2} = q\eta_{eff} A J_b T_f$.

Для расчета дисперсии флуктуаций зарядов Q_{Σ} и Q_{C_2} можно воспользоваться известными результатами для случайного процесса Винера—Леви [6], тогда $\Delta Q_{C_2}^2 = q Q_{C_2}$ и $\Delta Q_{\Sigma}^2 = q Q_{\Sigma}$.

Таким образом, при максимальном времени считывания фотосигнала дисперсии сигнального и избыточного зарядов равны между собой $\overline{\Delta Q_{C_2}^2} = \overline{\Delta Q_{\Sigma}^2}$.

Отметим, что в рассматриваемом случае шумы фотосигнала $\overline{\Delta Q_{C_2}^2}$ и избыточные шумы $\overline{\Delta Q_{\Sigma}^2}$ определяются флуктуациями фонового излучения. Однако вследствие параллельности процессов накопления и считывания фотосигнала в ячейках одной строки пороговые характеристики рассматриваемой матрицы в VLIP-режиме при $t_{dc} = t_{dc}^{\max}$ будут примерно в $\sqrt{2}$ раз хуже абсолютного теоретического предела.

Режим ускоренного опроса

Ухудшение пороговых характеристик рассматриваемой смотрящей матрицы можно предотвратить, опрашивая ячейки строки за время $t_{dc} \ll t_{dc}^{\max}$. Действительно, в этом случае $Q_{C_2} \gg Q_{\Sigma}$ и выполняется условие $\overline{\Delta Q_{C_2}^2} \gg \overline{\Delta Q_{\Sigma}^2}$, иными словами, эффект ухудшения пороговых характеристик в смотрящей ИК-матрице с коммутирующими p - n -переходами, связанный с влиянием процесса накопления фотосигнала на процесс его считывания, будет подавлен. Однако режим ускоренного опроса, т. е. считывание сигнала за время $t_{dc} \ll t_{dc}^{\max}$ требует увеличения полосы частот усилителя и тем самым приводит к ужесточению требований к уровню шумов усилителя либо к уменьшению формата матрицы, работающей в VLIP-режиме. Вместе с тем архитектуру матрицы можно изменить таким образом, что это позволит реализовать режим ускоренного опроса, сохранив при этом требования к шумам зарядового усилителя и формат матрицы без изменений.

Действительно, выберем время считывания $t_{dc} = t_{dc}^{\max} / 4$. Тогда разделим ячейки каждого столбца Y_i на четыре группы и соединим электроды 1 ячеек, входящих в k -ю группу ($k = 1-4$), своей шиной столбца Y_{ik} (рис. 2). Две из этих шин Y_{i_1} и Y_{i_2} будут выходить на одну сторону матрицы, а две другие Y_{i_3} и Y_{i_4} — на противоположную. Подчеркнем, что в этом случае все четыре шины могут лежать в одной плоскости. Считывание фотосигнала с ячеек, входящих в k -ю группу, происходит одновременно. Опрос каждой из четырех групп ячеек столбца Y_i происходит последовательно за время $t_{dc}^{\max} / 4$, а опрос всего столбца — за время t_{dc}^{\max} . При опросе какой-либо k -й группы ячеек считываемый фотосигнал с каждого элемента группы подается на четыре независимых усилителя, а затем эти четыре выходных сигнала складываются. Так как шумы усилителей некоррелированы, то при сложении выходных сигналов четырех усилителей суммарная дисперсия будет равна сумме дисперсий шумов усилителей, в то время как флуктуации фотосигнала, связанные с флуктуациями фонового излучения, темнового тока и kTC -шумом скоррелированы, т. е. сложатся как неслучайные величины.

Таким образом, предложенная архитектура и алгоритм считывания фотосигнала в режиме ускоренного опроса позволяют реализовать крупноформатную матрицу с пороговыми характеристиками, близкими к абсолютному теор-

ретическому пределу, и числом усилителей, равным числу ячеек в столбце матрицы

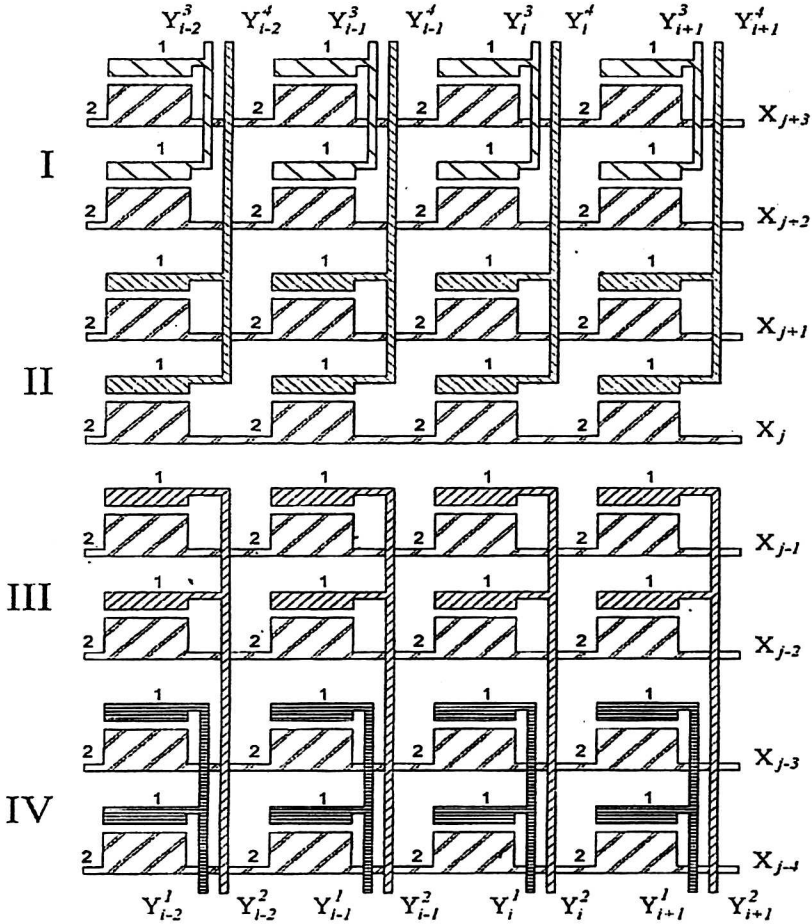


Рис. 2. Структура ячейки матрицы накопительных емкостей, позволяющая реализовать метод ускоренного опроса:

1 — электрод, соединенный с шиной столбца Y_i^k и образующий верхнюю обкладку конденсатора C_1 ; 2 — электрод, соединенный с шиной строки X_j и образующий верхнюю обкладку конденсатора C_2 ; I—IV — группы ячеек, на которые разбит столбец

Режим ускоренного опроса наряду с улучшением пороговых характеристик позволяет уменьшить в несколько раз число зарядовых усилителей рассматриваемой матрицы при внесении в ее архитектуру небольших изменений. Как и в случае, рассмотренном выше, разделим ячейки каждого столбца Y_i на четыре группы и соединим электроды 1 ячеек, входящих в k -ю группу, своей шиной столбца Y_{i_k} . Опрос каждой из четырех групп ячеек столбца Y_i происходит последовательно за время $t_{dc}^{\max}/4$. Последовательный опрос четырех групп элементов дает возможность в четыре раза сократить число зарядовых усилителей и число ячеек переноса в мультиплексоре. Для этого надо подключать зарядовые усилители лишь к шинам строк опрашиваемой k -й группы элементов i -го столбца, а шины строк тех групп элементов, которые накапливают фотосигнал, должны быть заземлены.

Оценим теперь параметры гибридной смотрящей матрицы с коммутирующими $p-n$ -переходами на спектральный диапазон 3—5 мкм. Рассмотрим случай, когда накопительные емкости C_1 и C_2 изготовлены на основе тонких слоев диэлектрика Nb_2O_5 . В дальнейших расчетах будем предполагать, что величина пробивного поля равна $1 \cdot 10^6$ В/см, $\epsilon = 40$ и величина обратного смещения, подаваемого на $p-n$ -переход на основе $Hg_{1-x}Cd_xTe$, состава $x = 0,3$ или $InSb$ в начальный момент процесса накопления равна 2 В.

Пусть площадь фоточувствительных $p-n$ -переходов $A = 20 \times 20$ мкм², а расстояние между ними составляет 20 мкм. Площади электродов 1 и 2, образующих емкости C_1 и C_2 , выберем равными, соответственно, $A_1 = 30 \times 5$ мкм²

и $A_2 = 30 \times 10$ мкм². Тогда при толщине слоя Nb_2O_5 , равной 1000 \AA , емкости C_1 и C_2 оказываются равны 0,5 и 1 пФ, соответственно.

Для определенности будем считать, что излучение является монохроматическим, с длиной волны 4 мкм. В расчетах примем также, что $\eta = 0,7$, ЭДС шума усилителя $E_n = 20$ нВГц^{-1/2}, плоский угол зрения на фон $\psi = 60^\circ$ и фоновый ток (при температуре фона 300 К) много больше темнового тока $p-n$ -перехода. Для данных параметров матрицы, следуя теории, развитой в работах [1—5], получим, что гибридная смотрящая матрица форматом 512×512 работает в VLIP-режиме, причем время накопления фотосигнала в ней равно 5,7 мс, а мощность, эквивалентная шуму NEP, равна $4,5 \cdot 10^{-14}$ Вт. При расчете пороговых характеристик мы считали, что в рассматриваемой гибридной матрице реализован режим ускоренного опроса в варианте архитектуры с числом усилителей, равным числу ячеек в столбце матрицы. В случае упрощенной архитектуры, когда число усилителей в четыре раза меньше ячеек в столбце матрицы, при тех же параметрах накопительных емкостей, угле зрения на фон и шумах усилителя в VLIP-режиме будет работать матрица форматом 256×256 элементов, причем минимальная обнаруживаемая мощность такой матрицы возрастет в $\sqrt{2}$ раз по сравнению с предыдущим случаем и будет равна $NEP = 6,4 \cdot 10^{-14}$ Вт.

З а к л ю ч е н и е

Рассмотренный метод подавления избыточных шумов в смотрящих ИК-матрицах с коммутирующими $p-n$ -переходами позволяет реализовать в таких матрицах пороговые характеристики, близкие к абсолютному теоретическому пределу, а также в несколько раз уменьшить число усилителей, необходимое для считывания фотосигнала. Однако в варианте архитектуры с уменьшенным числом усилителей существенно ужесточаются требования к шумам последних, так как в противном случае значительно уменьшается формат матрицы, работающей в VLIP-режиме. Поэтому реализовать крупноформатную матрицу, имеющую такую упрощенную архитектуру, в планарном варианте практически невозможно, поскольку время накопления в ней оказывается недостаточно большим [1]. Эту трудность можно преодолеть в гибридном варианте матрицы, время накопления в которой может составлять величину порядка нескольких миллисекунд при температуре фона 300 К.

Л и т е р а т у р а

1. Морозов В. А., Осипов В. В., Селяков А. Ю., Таубкин И. И. Интегральный матричный присмнник нового типа на основе $InSb$ //Микроэлектроника. 1996. Т. 25. № 3. С. 163—175.
2. Осипов В. В., Пономаренко В. П., Селяков А. Ю. Новая гибридная фокальная матрица ИК-диапазона//Там же. 1997. Т. 26. № 1. С. 12—20.

3. Morozov V. A., Osipov V. V., Selyakov A. Yu., Taubkin I. I. New infrared integrated focal plane arrays//Proceedings 1997 International semiconductor device research symposium. — Charlottesville, USA, 1997. P. 293—296.

4. Osipov V. V., Ponomarenko V. P., Selyakov A. Yu. Ultimate performance of new infrared HgCdTe focal plane arrays//PROC. SPIE. 1999. V. 3819. P. 16—31.

5. Осипов В. В., Пономаренко В. П., Селяков А. Ю. Предельные характеристики новых смонтированных гибридных ИК-матриц на основе HgCdTe//Прикладная физика. 1999. Вып. 2. С. 9—29.

6. Букцингем М. Шумы в электронных приборах и системах. — М.: Мир, 1986. — 399 с.

Mode accelerated discharge in IR FPA with commutating p — n -junctions

V. V. Osipov, A. Yu. Selyakov

State Unitary Enterprise «RD&P Center "Orion"», Moscow, Russia

Excess noises was analysed in a FPA with commutating p — n -junctions. The noises was caused by parallelism of integration and discharge of photosignal in the FPA. It is shown, that the noises result in worsening of threshold characteristics of the FPAs, operated in BLIP-mode in $\sqrt{2}$ times, in comparison with absolute theoretical limit. We propose and analyse new method of photosignal processing-mode of accelerated discharge. The method allows to suppress the noises. It is proposed new architecture of the FPA, which allows to realize the method without ruggedization of requirements of amplifier noises and without decreasing of pixel number of the FPA, operated in BLIP-mode. We propose also a architecture variant, which also allows to decrease number of amplifiers.