

## ФОТОПРИЕМНИКИ С БОЛЬШИМ ДИНАМИЧЕСКИМ ДИАПАЗОНОМ НА БАЗЕ ПОЛУПРОВОДНИКОВ С ГЛУБОКИМИ ПРИМЕСЯМИ

Воробей Р.И.<sup>1</sup>, Гусев О.К.<sup>1</sup>, Жуковский П.В.<sup>2</sup>, Свистун А.И.<sup>1</sup>, Тявловский К.Л.<sup>1</sup>, Шадурская Л.И.<sup>1</sup>, Яржембицкая Н.В.<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Белорусский национальный технический университет, Минск, Беларусь

<sup>2</sup>Люблинский технический университет, Люблин, Польша

В ряде применений фотоприёмников, например, технике формирования изображений с высоким контрастом, регистрации слабых оптических излучений в условиях существования высококонтрастных помех и т.д., требуется формировать измерительный сигнал в широком диапазоне яркостей. Высокий абсолютный контраст изображения характерен для сцен, содержащих слабоосвещённые объекты и встречную (контровую) засветку [1]. Использование обычных фотоприёмников с недостаточно широким динамическим диапазоном чувствительности не позволяет получить корректный отклик фотосигнала при наблюдении объектов с большими контрастами яркостей (освещённости). Задача расширения динамического диапазона актуальна и для фотоприёмников, работающих в режиме накопления заряда, например, в фотоприёмных ПЗС-матрицах. При решении этой проблемы основное внимание уделяется задаче расширения диапазона преобразования "снизу" за счёт увеличения чувствительности. И гораздо меньше внимания уделяется проблеме расширения динамического диапазона при больших интенсивностях освещения – "сверху".

Существующие методы решения проблемы недостаточно широкого динамического диапазона фотоприёмников можно разделить на три категории: это а) аппаратные; б) алгоритмические (программные); в) аппаратно-алгоритмические.

Первая группа методов связана с необходимостью существенного изменения конструкции [2], применения новых материалов и технологий, дорогостоящих систем охлаждения приёмных матриц, мощных процессоров *DSP*, а также АЦП с высокой разрядностью, что требует больших затрат при несущественном увеличении диапазона чувствительности. Возможно также использование составных фотоприёмников, образованных двумя и более элементами, каждый из которых чувствителен в своем диапазоне плотностей мощности оптического излучения [3], что увеличивает сложность и площадь приёмника. Отметим, что использование аппаратных методов расширения динамического диапазона не приводит к ухудшению быстродействия фотоприёмника.

Вторая группа методов подразумевает применение новых алгоритмов обработки данных. Известен способ [4], при котором последова-

тельно получается серия изображений одного и того же объекта при разных экспозициях, включающих весь диапазон яркостей (брекетинг экспозиции). После получения серии снимков для каждого пикселя изображения рассчитывается интерполированное значение фотосигнала. Недостатком алгоритмического метода является его ограниченная применимость (только для статических изображений), большие вычислительные и временные затраты при получении интерполированного изображения и возможность получения артефактов.

К третьей группе методов можно отнести режим *BLC* (*Back Light Compensation*), который реализуется в виде переключения порогов срабатывания электронного затвора ПЗС-матрицы (или диафрагмы объектива) и системы АРУ так, что они становятся на 10-20 % выше обычного. В результате, самые яркие объекты (например, светлое окно) "зарезаются в белом", а объекты среднего уровня (лицо человека, стоящего перед окном) усиливаются и становятся хорошо видимыми [1]. В итоге, режим *BLC* не расширяет динамический диапазон, а лишь сдвигает и искажает его для лучшего наблюдения темных объектов, ценой потери ярких. Модификации режима в виде дополнительного переключения, в которых срабатывают схемы автоматического регулирования (видеокамеры фирм *Watec*, *Sony* и др.), также требуют увеличения времени экспозиции фотоприёмника. Таким образом, режим "*BLC*" полезен в ряде случаев телевизионного наблюдения, но его нельзя использовать в автоматическом виде, так как камера "не знает", когда оператора интересует объект перед ярко освещённой поверхностью, а когда важным является изображение самой этой поверхности.

Таким образом, аппаратные методы имеют преимущества перед программными и комбинированными методами, т.к. их использование не приводит к ухудшению быстродействия системы и в ряде случаев позволяет получить новые функциональные свойства. В качестве основы для формирования приборных структур предлагается использовать полупроводники с собственной проводимостью, легированные глубокой многозарядной примесью. Выбор такого фотоприёмника обусловлен следующими соображениями. Фотоэлектрические преобразователи изготавливают либо на основе полупроводников с примесной (с концентрацией до  $10^{19}$  см<sup>-3</sup>) прово-

димостью, либо полупроводников с собственной проводимостью. В первом случае достигается высокая чувствительность, но уже при малой плотности мощности наблюдается насыщение передаточной характеристики. Во втором случае насыщения не происходит и при высоких плотностях мощности оптического излучения, но чувствительность фотоприемника существенно ниже [5, 6].

При формировании такого фотоприёмника в полупроводник с собственной проводимостью вводится известная многозарядная примесь в заданной концентрации. Путем использования механизмов управления зарядовым состоянием глубоких примесных центров [7] при оптической перезарядке этой примеси в широком диапазоне плотностей мощности оптического излучения продлевается линейность энергетической характеристики до плотностей мощности излучения, превышающих порог насыщения характеристик и собственных и примесных фотоприемников. Таким образом, реализуется большой динамический диапазон энергетической характеристики фотоприемника.

Фотоприемник выполняется в одном объеме полупроводника с собственной проводимостью, легированного примесью с двумя и более глубокими многозарядными уровнями. Например, на рисунке 1 приведена энергетическая диаграмма *Ge* с собственной проводимостью, легированного *Au* (зарядовые состояния отмечены в скобках). Ряд примесей, например *Pt*, формирует три глубоких энергетических уровня. При этом конструкция фотоприёмника не усложняется, а характеристики приборной структуры с глубокими многозарядными примесями определяются, в основном, характером рекомбинационных процессов через уровни примеси.

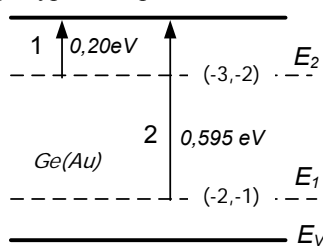


Рисунок 1 – Энергетическая диаграмма *Ge*, легированного глубокой примесью *Au*

Моделирование рекомбинационных процессов в фотоприёмных структурах с многозарядными примесями [8] показало, что наблюдаются два диапазона линейности энергетической характеристики, конкретный вид которой зависит от вида примеси и ее концентрации.

Автоматическая перезарядка зарядовых состояний глубокой многозарядной примеси при увеличении плотности мощности оптического сигнала приводит к формированию двух поддиа-

пазонов энергетической характеристики фотоприемника уровней (рисунок 2).

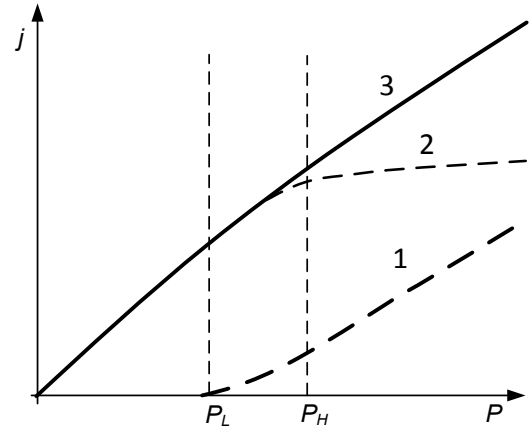


Рисунок 2 – Передаточная характеристика фотоприемника с тремя зарядовыми состояниями глубокой примеси

Первый поддиапазон соответствует линейной рекомбинации при низких плотностях мощности оптического излучения, меньших некоторого порогового значения  $P_L$ , а второй поддиапазон линейности энергетической характеристики наблюдается при высоких плотностях мощности оптического излучения больших  $P_H$ . Например, фоточувствительность германия с примесью, формирующей три зарядовых состояния (-1, -2, -3), определяется энергетическими переходами на глубокие уровни  $E_1$  и  $E_2$  (рисунок 1). При мощности оптического излучения  $P < P_L$  большинство примесных ионов находится в зарядовом состоянии (-3), а концентрация зарядовых состояний (-2) и (-1) существенно меньше, и реализуется энергетический переход 1 с уровня  $E_2$ . При мощности оптического излучения  $P > P_H$  большинство ионов многозарядной примеси находятся в зарядовом состоянии (-1), включается энергетический уровень  $E_1$ , а уровень  $E_2$  не работает. При последовательном заполнении уровней многозарядной примеси при освещении с увеличивающейся плотностью мощности реализуется передаточная характеристика, обусловленная суммой зависимостей заполненности уровней  $E_1$  и  $E_2$  (рисунок 2). Подключение уровня  $E_2$  характеризуется передаточной характеристикой (линия 2) с низкой чувствительностью, но простирающейся до больших уровней мощности оптического излучения, когда характеристика 1 поддиапазона высокой чувствительности находится в состоянии насыщения. В фотоприёмнике с однозарядной примесью реализуется передаточная характеристика типа 1.

Таким образом, при изменении мощности оптического излучения происходит изменение концентрации зарядовых состояний примеси с разными энергиями ионизации и автоматическое переключение между уровнями по мере их заполнения соответственно мощности оптиче-

ского излучения. Результатом является расширение динамического диапазона чувствительности фотоприемника (линия 3).

Отметим, что внутри поддиапазонов  $P > P_H$  и  $P < P_L$  энергетическая характеристика фотоприемника линейна (рисунок 3), а внутри поддиапазона  $P_L < P < P_H$  вид энергетической характеристики может отличаться от линейной. Границами поддиапазонов чувствительности  $P_L$  и  $P_H$  можно управлять изменением концентрации многозарядной примеси и ее типом (рисунок 4).

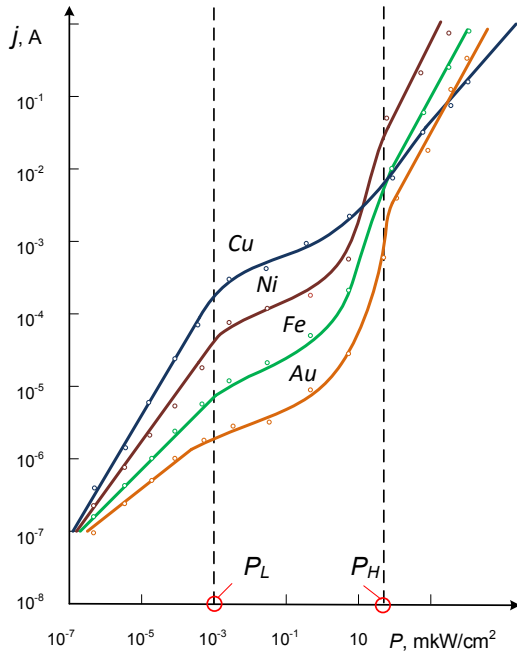


Рисунок 3 – Экспериментальные энергетические характеристики фотоприемника на основе германия, легированного Ni, Fe, Cu, Ag ( $\lambda = 1,7$  мкм)

При изменении типа многозарядной примеси меняются также и положения уровней  $E_1$ ,  $E_2$ , что приводит не только к изменению диапазонов регулировки границ переключения поддиапазонов чувствительности, но и к изменению спектральной чувствительности фотоприемника. Таким образом, за счет варьирования вида примеси и ее концентрации можно создавать не только фотоприемники, работающие в заданном диапазоне плотностей мощности оптического излучения [8], но и оптически управляемые фотоприемники [9].

Например, для изменения заселенности уровней глубокой примеси в различных зарядовых состояниях может использоваться подсветка на длине волны  $\lambda_0$  (рисунок 5). В зависимости от плотности мощности сигнала с длиной волны  $\lambda_0$  благодаря особенностям перезарядки примесных уровней в зависимости от уровня интенсивности управляющей подсветки реализуются различные зарядовые состояния многозарядной примеси и, соответственно, спектральные характеристики с максимумами на длине волны  $\lambda_1$  или  $\lambda_2$ .

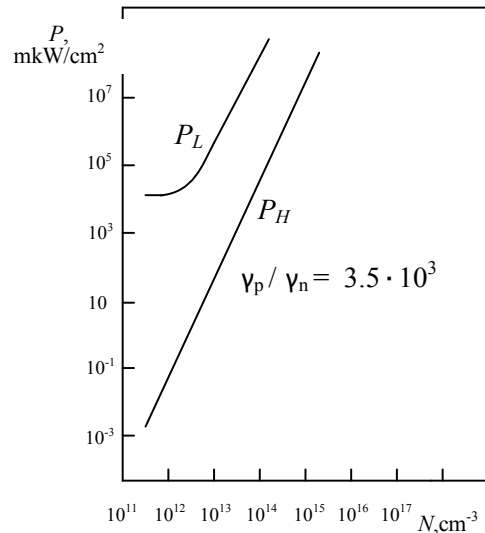


Рисунок 4 – Зависимость границ поддиапазонов энергетической характеристики от концентрации акцепторной примеси Ge(Cu)

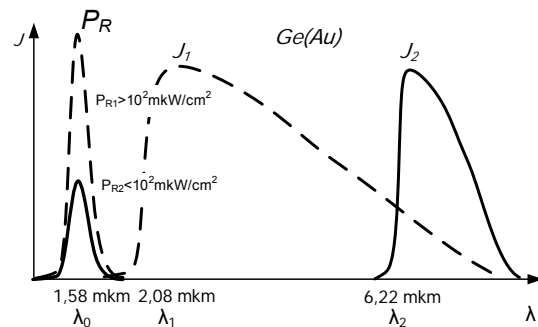


Рисунок 5 – Переключение спектральной характеристики фотоприемника с глубокой многозарядной примесью при дополнительной подсветке

Таким образом, изменяя интенсивность излучения из области собственного поглощения можно управлять концентрацией примеси в различных зарядовых состояниях с разными уровнями энергии ионизации (рисунок 1). При мощности управляющего излучения  $\lambda_0$   $P < P_H$  работает уровень  $E_2$  и фотоприёмное устройство чувствительно к излучению с длиной волны  $\lambda_1$ . При интенсивности управляющего излучения  $\lambda_0$   $P > P_L$  работает уровень  $E_1$  и фотоприёмное устройство чувствительно к излучению с длиной волны  $\lambda_2$ . Таким образом, за счет изменения интенсивности управляющей подсветки из области собственного поглощения включается спектральная чувствительность одной и той же фоточувствительной области фотоприёмника либо к спектральной области  $\lambda_1$ , либо –  $\lambda_2$ , причем при работе с интенсивностью управляющего излучения  $P > P_H$  существенно расширяется динамический диапазон чувствительности фотоприёмного устройства [10]. Для реализации оперативного управления видом спектральной характеристики при использовании традиционных фотоприемни-

ков понадобилось бы использование в одном устройстве нескольких фотоприемников, каждый с оптическим фильтрующим элементом, светоделительное устройство и схема объединения электрических сигналов.

В предлагаемом фотоприёмном устройстве, изготовленном в одном объеме полупроводникового материала, реализуется возможность управления видом спектральной характеристики, расширение спектрального и динамического диапазона, исключение оптических фильтрующих элементов для формирования требуемого вида спектральной характеристики. Например, при использовании структуры  $Ge(Cu)$  реализуется переключение вида спектральной характеристики, определяемой включением зарядовых состояний на уровнях  $E_v + 0,32$  эВ и  $E_c - 0,26$  эВ (длины волн на спектральной характеристике  $\lambda_1=2,9$  и  $\lambda_2=4,77$  мкм). Для получения иных спектральных характеристик могут быть использованы структуры с другими полупроводниками и многозарядными примесями.

Отметим, что и расширение динамического диапазона и переключение спектральных характеристик реализуется при заполнении разных зарядовых состояний нескольких глубоких уровней примеси с различными постоянными времени рекомбинации. При изменении мощности оптического излучения (уровня инжекции)  $\tau_n$  и  $\tau_p$  в случае легирования акцепторной примесью изменяются на несколько десятичных порядков. Это приводит к тому, что при переходе на другой поддиапазон энергетической и спектральной характеристик, также существенно изменяется и быстродействие фотоприёмника с глубокой многозарядной акцепторной примесью.

Иная ситуация реализуется при введении в собственный полупроводник донорной глубокой примеси, когда уровень Ферми расположен выше уровня примеси и оптическая перезарядка центров в различных зарядовых состояниях не происходит. Примесный центр заполнен электронами как при низком, так и при высоком уровне инжекции, а значит  $\tau_n$  и  $\tau_p$  практически не будут зависеть от уровня инжекции (рисунок 6). Это, в свою очередь, приводит к тому, что на энергетической характеристике будет отсутствовать нелинейность между уровнями мощности  $P_L$  и  $P_H$ . Характеристика чувствительности будет линейна на всем динамическом диапазоне, не будет изменяться и быстродействие фотоприёмника. Однако устраняется возможность переключения спектральной характеристики.

Использование полупроводников с глубокими многозарядными примесями при создании фотоэлектрических полупроводниковых преобразователей позволяет существенно (на несколько десятичных порядков) расширить динамический диапазон чувствительности фотопри-

ёмника и получить новые функциональные свойства при сохранении высокого быстродействия.

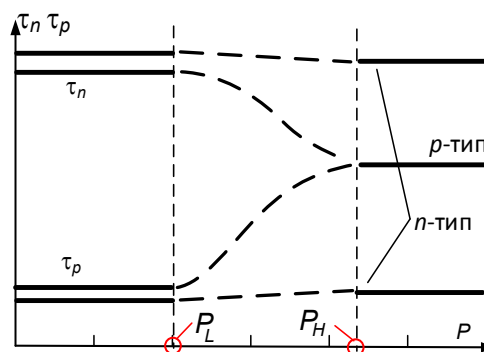


Рисунок 6 – Зависимости постоянной времени рекомбинации глубокой акцепторной и донорной примеси

- 1 Гвоздек Михаэль. Справочник по технике для видеонаблюдения. Планирование, проектирование, монтаж. Техносфера. 2010.
- 2 Каримов А.В., Ёдгорова Д.М., Гиясова Ф.А., Азимов Т.М., Бузруков У.М., Якубов А.А. Особенности фотоэлектрических характеристик фотоэлектропреобразовательных структур. Функциональная микро- и нанoeлектроника. (2007). № 4. 23-28.
- 3 Revolutionary sensor blazes the way to a new era of high image quality – “Super CCD EXR” – [www.fujifilm.com/photokina2008/pdf/release/super\\_ccd\\_exr\\_e.pdf](http://www.fujifilm.com/photokina2008/pdf/release/super_ccd_exr_e.pdf).
- 4 Колобродов В.Г. и др. Способ получения цифрового изображения с большим динамическим диапазоном. Патент 2470366 России, МПК G06T 5/50.
- 5 Филачев А.Н. и др. Современное состояние и магистральные направления развития твердотельной фотоэлектроники. Москва. Физматкнига, 2010.
- 6 Филачев, А.Н. и др. Твердотельная фотоэлектроника. Москва. Физматкнига. 2011.
- 7 Гусев О.К. и др. Методология и средства измерений параметров объектов с неопределенными состояниями. – Минск: БНТУ. 2010.
- 8 Гусев О.К. и др. Проектирование и управление метрологическими характеристиками фотоэлектрических преобразователей на основе полупроводников с многозарядными примесями. Датчики и системы. (2011). № 1. – 22-24.
- 9 Гусев О.К. и др. Фотоприемное устройство, управляемое подсветкой. Патент № 15840 РБ, МПК H 01L 31/16.
- 10 Гусев О.К. и др. Алгоритм определения метрологических характеристик широкодиапазонных полупроводниковых преобразователей с многозарядными примесями. Приборы и методы измерений. 3 (2011) № 2. 19-22.