УДК 621.383.7

DOI: 10.36845/2073-8250-2020-257-2-28-36

МЕТОДИКА ОПРЕДЕЛЕНИЯ ПАРАМЕТРОВ МИКРОЛИНЗ ДЛЯ ЭЛЕМЕНТОВ ФОТОЧУВСТВИТЕЛЬНОЙ ПЗС ИС С ПОМОЩЬЮ TCAD-МОДЕЛИРОВАНИЯ

Н.С. Контев, А.А. Пугачёв

АО «НПП «Пульсар», 105187, Москва, Окружной проезд, д. 27

Разработана методика моделирования фоточувствительной ячейки с микролинзой ПЗС СБИС с межстрочным переносом. Микролинза повышает фоточувствительность ячейки и снижает смаз изображения. Методика основана на расчёте и сравнении интегралов скорости объёмной фотогенерации по площадям различных областей фотоячейки, являющихся областями сбора и переноса фотогенерированных носителей заряда. Данный метод не требует моделирования полного цикла накопления кадра ячейки, что значительно сокращает время моделирования и позволяет оценивать множество вариантов конструкций микролинз. Метод реализован в среде программного комплекса Sentaurus TCAD (Synopsys). Приведены результаты моделирования ячеек с различными микролинзами. Методика также подходит для оптимизации микролинз фотоячеек КМОП-фотодиодных СБИС.

Ключевые слова: фотоприёмная матричная СБИС; прибор с зарядовой связью, микролинза; метод моделирования; приборно-топологическое моделирование; TCAD

Сведения об авторах: Никита Сергеевич Контев; Андрей Алексеевич Пугачёв, pugachev@pulsarnpp.ru

TCAD-ASSISTED TECHNIQUE FOR DETERMINING THE PARAMETERS OF MICROLENSES USED IN PHOTOSENSITIVE CCD VLSI

N.S. Koptev, A.A. Pugachev

S&PE Pulsar JSC, 105187, Moscow, Okruzhnoy pr., 27

In this paper we introduce the simulation technique for photosensitive cell with CCD VLSI microlens with interline transfer. A microlens enhances the photosensitivity of the cell and reduces image blur. The technique is based on the calculation and comparison of the volumetric photogeneration rate integrals of different areas of the photocell, where generated charge carriers are collected and transferred. This technique does not require simulation of the full frame accumulation cycle of the cell, significantly reducing the time of simulation and enabling the evaluation of many design options for microlenses. The technique is implemented in the Sentaurus TCAD (by Synopsys). In the paper we present the results of simulation made for cells with various microlenses. The proposed technique can also be used for the optimization of microlenses of CMOS photodiode VLSI photocells.

Keywords: photo-integrated matrix VLSI, charge-coupled device, microlens, simulation technique, design simulation, TCAD

Data on authors: Nikita Sergeevich Koptev; Andrey Alekseevich Pugachev, pugachev@pulsarnpp.ru

Введение

Для повышения фоточувствительности и уменьшения перекрёстных световых и диффузионных помех в матричных СБИС на приборах с зарядовой связью (ФЧ ПЗС) и в СБИС на фотодиодах и КМОП транзисторах (КМОП-ФД) используются микролинзы [1], рис. 1.

Микролинзы (МЛ) формируются над каждой фотоприёмной ячейкой (ФЯ) и собирают световой поток со всей поверхности ячейки в её фоточувствительную область. Это позволяет не только увеличить долю света, попадающего непосредственно в фоточувствительную часть (то есть увеличить фактор заполнения ячейки), но и избежать попадания света в периферийные области ячейки, где он может либо проникнуть в соседние ячейки за счёт межслойных переотражений, либо сгенерировать электронно-дырочные пары, которые за счёт диффузии также могут попасть в соседние ячейки. Таким обра-

зом, применение микролинз повышает фоточувствительность матриц пропорционально соотношению активной площади (светочувствительный элемент) и пассивной площади фотоприёмной ячейки и улучшает их разрешающую способность за счёт увеличения пространственной модуляции сигнала вследствие уменьшения перекрёстных помех.

Основные параметры микролинзы, влияющие на эффективность сбора светового потока, следующие:

- радиус микролинзы,
- высота постаменты,
- апертура линзы.

В данной работе представлена методика быстрого моделирования фотоприёмной ячейки с микролинзой, позволяющая оценить степень увеличения фоточувствительности ФЯ. Вопросы технологии изготовления микролинз, и соответственно, вопросы моделирования такой технологии в данной работе не рассматриваются.

Рис. 1
Принцип действия микролинз

Обоснование методики определения эффективности микролинзы

Для моделирования ФЯ с микролинзами и определения параметров микролинз разработаны как аналитические [1, 2], так и численные [3-5] модели. Аналитические модели позволяют оперативно оценить положение точки фокуса линзы по её основным геометрическим параметрам. Такие модели, однако, не могут оценить влияние объёмной структуры ячейки на эффективность системы линза+ячейка. Численные модели позволяют учесть все физические процессы, связанные с распространением света в системе линза+ячейка, последующим его поглощением в объёме полупроводника и дальнейшим перераспределением фотогенерированных носителей заряда. Данные модели реализованы в различных вариантах в системах компьютерного моделирования, в том числе в Sentaurus TCAD (Synopsys). Однако вычислительные затраты при анализе, например, фоточувствительных ПЗС с межстрочным переносом, очень велики: часы на один вариант системы линза+ячейка при моделировании полного цикла одного кадра, включающего стадии накопления, горизонтального переноса, вертикального переноса и электронного затвора. При этом значительное время дополнительно тратится на создание моделей структуры прибора для каждого нового варианта конструкции микролинзы.

Нами предлагается методика определения параметров микролинзы, основанная на расчёте величины объёмной фотогенерации в различных областях ФЯ без моделирования процессов переноса заряда, в отличие от метода, предлагаемого, например, в [2].

Определить эффективность микролинзы можно путём сравнения числа элект-

тронов, которые были собраны в область накопления к моменту окончания времени интегрирования с общим числом электронов, которые были фотогенерированы за это время в объёме фотоприёмной ячейки. Для этого в общем случае необходимо сначала смоделировать её реальную структуру, а затем процессы перераспределения зарядов в ней в течение времени накопления. Такой подход требует значительных аппаратных ресурсов и времени моделирования, так как оптимальные параметры МЛ получаются путём многократного перебора различных сочетаний их значений. Анализ многочисленных результатов двумерного моделирования различных фотоприёмных ячеек без микролинз показал, что для определения эффективности их работы достаточно иметь информацию о скорости фотогенерации в том объёме кремния, из которого фотогенерированные электроны будут собираться в область хранения ФЯ. Предлагается подход, в котором числовой мерой эффективности микролинзы выбрано отношение интеграла скорости фотогенерации по площади области сбора фотогенерированных зарядов к сумме аналогичных интегралов, взятых по всему оставшемуся объёму фотоприёмного элемента. Данную характеристику будем называть «коэффициентом усиления микролинзы». При этом для TCAD-моделирования необходима информация только о конфигурации области сбора и не требуется модель объёмной структуры конкретной ФЯ и также не требуется проведение расчёта распределения фотогенерированных электронов к моменту окончания времени стадии накопления, как в [2-5]. Указанная числовая мера является одновременно мерой повышения фоточувствительности ячейки.

Для реализации предложенного подхода предлагается замена реальной структуры ФЯ на некоторую «примитивную» структуру, разбитую на области для оценки величин интегралов фотогенерации. Примитивная структура требуется только для оценки распределения скорости фотогенерации в объёме кремния, поэтому она не содержит сложных p - n -переходов, как в реальной ячейке. Область сбора носителей в потенциальную яму и остальные области выбираются из анализа двумерного распределения потенциала в объёме реальной фотоприёмной ячейки, которое показано на рис. 2.

«Примитивная» структура моделируемой фотоприёмной ячейки ПЗС имеет на своей поверхности систему диэлектриков и микролинзу, совпадающие с таковыми в реальной ячейке, в то время как объёмная структура профиля примеси «примитив-

ной ячейки» представляет собой p - n -переход с глубиной залегания порядка 1,0 мкм, работающий при нулевом смещении.

Моделирование выполняется с помощью модуля Ray Tracer (RT) ПО Sentaurus TCAD (Synopsys). RT использует рекурсивный алгоритм трассировки, который начинает трассировку с исходного луча и затем отслеживает пропускание и отражение луча от всех поверхностей, встречающихся на его пути [3]. Визуализация трасс лучей позволяет определить область их максимальной концентрации в объёме ФЯ и наглядно получить информацию о том, каким образом скорректировать геометрию линзы.

На рис. 3 показана структура «примитивной» ячейки с микролинзой. Для максимального совпадения со структурой реальной ПЗС-ячейки в модель структуры

Рис. 2

Двумерное распределение потенциала в фотоприёмной ячейке с указанными областями интегрирования:

1 – область интегрирования фотодиода; 2 – область интегрирования правой;
3 – область интегрирования левой; 4 – область интегрирования подложки фотодиода

Рис. 3

а – «примитивная» структура ячейки с микролинзой: 1 – микролинза, 2 – планаризирующий слой, 3 – постамент, 4 – графическое изображение распределения скорости фотогенерации, 5 – экраны вертикальных регистров, 6 – подложка; б – ход лучей в ячейке: 1 – исходные лучи, 2, 3, 4, 5 – лучи с одним, двумя, тремя и четырьмя переотражениями соответственно

Рис. 4

«Примитивная» структура без микролинзы: 1 – защитный экран; 2 – планаризатор; 3 – графическое изображение распределения скорости фотогенерации; 4 – область сбора фотогенерированных носителей в фотодиод; 5 – разрешающий затвор; 6 – подложка р-типа; 7 – лучи в структуре

«примитивной» ячейки были внесены металлические экраны, которые защищают регистр ячейки от попадания отражённого в диэлектрических слоях света.

Для расчёта эффективности микролинзы дополнительно рассчитываются интегралы скорости фотогенерации в «примитивной» ячейке без микролинзы, рис. 4.

Таким образом, подход основан на сравнении интегралов скоростей фотогенерации в областях, полностью определяющих соотношение числа фотогенерированных носителей заряда, собранных в фотодиод и «утерянных» в соседних областях. Данный подход оценки эффективности линзы по величине фотогенерации в заданном объёме физически корректен и его точность

зависит от точности задания границ области сбора фотогенерированных носителей заряда.

Проведённые расчёты показали, что количество итераций подбора пары «радиус микролинзы – высота постамент», дающих максимальную эффективность микролинзы, может превышать 100. Аналогичную процедуру было бы невозможно провести с помощью двумерного моделирования реальной структуры ПЗС ячейки при её работе в режиме накопления фотогенерированного заряда, так как время моделирования одного варианта «линза+постамент» такой ячейки составляет порядка 10–40 минут, причём без учёта времени коррекции самой структуры.

Рис. 5

Распределение лучей светового потока: 1 – начальная траектория светового потока (исходный луч); 2 – одно отражение луча; 3 – два отражения луча; 4 – три отражения луча; 5 – четыре отражения луча

Рис. 5 демонстрирует направления лучей света в микролинзе. На рисунке можно увидеть, как преломляются и отражаются лучи светового потока (до заданного минимального значения интенсивности). Если значительная часть лучей отражается множество раз, прежде чем попасть в фотодиод, то такая линза имеет неподходящие параметры и, следовательно, недостаточную эффективность.

Примеры результатов моделирования

На рис. 6-9 приведены примеры полученных оценок конструкций ячеек с микролинзами, демонстрирующие возможности метода.

На рис. 6 даны распределения скорости фотогенерации для линзы радиусом 2,75 мкм и постаментом толщиной 1 мкм. Данная линза показала наилучший коэффициент усиления среди всех рассмотренных вариантов, равный 1,7.

На рис. 7 дана зависимость отношения интеграла скорости фотогенерации в

Рис. 6

Распределение скорости фотогенерации для линзы с максимальным коэффициентом усиления: 1 – длина волны 450 нм, 2 – длина волны 555 нм, 3 – длина волны 700 нм

области сбора фотодиода при заданном угле падения света к интегралу скорости генерации при перпендикулярном падении света на поверхность ячейки для наилучшей микролинзы. Данное отношение показывает угловую эффективность сбора носителей в ячейку.

Рис. 7

Зависимость интеграла скорости фотогенерации в области сбора фотодиода от угла падения пучка света для наилучшей линзы

Рис. 8

Зависимость интеграла скорости фотогенерации от радиуса микролинзы при угле падения светового потока 90 градусов

Рис. 9

Зависимость интеграла скорости фотогенерации от радиуса микролинзы при угле падения светового потока 30 градусов

На рис. 8 дана зависимость интеграла скорости фотогенерации в области сбора фотодиода от радиуса линзы при угле падения светового потока 90 градусов, а на рис. 9 – для предельного для ПЗС угла падения 30 градусов.

В таблице приведены коэффициенты усиления линз с различными радиусами R и толщинами постаментов P . Результаты таблицы наглядно демонстрируют, что коэффициент усиления изменяется в достаточно узких пределах.

Таблица

Сравнение коэффициента усиления K микролинз с различной геометрией

Параметры линзы	$R = 2,75$ мкм	$R = 3,0$ мкм	$R = 3,5$ мкм
Длина волны	$P = 1$ мкм	$P = 1,5$ мкм	$P = 1,5$ мкм
$\lambda = 450$ нм	$K = 1,75$	$K = 1,56$	$K = 1,29$
$\lambda = 555$ нм	$K = 1,72$	$K = 1,57$	$K = 1,30$
$\lambda = 700$ нм	$K = 1,73$	$K = 1,57$	$K = 1,30$

Тем не менее повышение фоточувствительности ячейки более чем в 1,5 раза является очень хорошим показателем для данной характеристики.

Заключение

Разработанный метод приборно-технологического моделирования эффективности микролинз фоточувствительных ПЗС-ячеек в среде Sentaurus TCAD (Synopsys) позволяет подобрать основные параметры микролинзы по критерию максимизации её фоточувствительности. Получены зависимости коэффициента усиления линзы от геометрических параметров микролинзы, которые позволяют повысить фоточувствительность ПЗС-ячеек.

Метод обладает высокой производительностью и нацелен на применение в процессе проектирования фоточувствительных ПЗС и КМОП-фотодиодных СБИС.

Благодарности

Авторы выражают благодарность магистранту МИЭМ НИУ ВШЭ Морозовой Екатерине Игоревне за скрупулёзную отработку методики моделирования и многочисленные результаты расчётов, способствовавшие её дальнейшему совершенствованию.

Литература

1. Haekwan Oh, Geunyoung Kim, Hyunwoo Seo, Yotak Song, Keekeun Lee, Sang Sik Yang Fabrication of micro-lens array using quartz wet etching and polymer. *Sensors and Actuators A: Physical*, 2010, vol.164, pp. 161–167.
2. Ph Nussbaumyx, R Völkely, H P Herzigy, M Eisnerz and S Haselbeckz Design, fabrication and testing of microlens arrays for sensors and microsystems. *Pure Applied Opt.* 6 (1997), pp.617–636.
3. T. O. Körner, R. Gull Combined optical/electrical simulation of CCD cell structures by means of the finite-difference time-domain method. *IEEE*

Transactions on Electron Devices, 2000, vol. 47, issue. 5, pp. 931-938.

4. T. Satoh et al. Optical limitations to cell size reduction in it-cdd image sensors. *IEEE Transaction Electron Devices*, 1997, vol. 44, pp. 1599–1603.
5. H. Mutoh Simulation for 3-D optical and electrical analysis of CCD. *IEEE Transaction Electron Devices*, 1997, vol. 44, pp. 1604–1610.
6. Sentaurus TCAD. Industry-standard process and device simulators. [Электронный ресурс]. URL:https://www.google.ru/url?sa=t&rct=j&q=&esrc=s&source=web&cd=&ved=2ahUKEwiL-dr5zYPqAhUeAhAIHXUeB9QQFjAAegQIARAB&url=https%3A%2F%2Fwww.synopsys.com%2Fcontent%2Fdam%2Fsynopsys%2Fsilicon%2Fdatasheets%2Fsentaurus_ds.pdf&usg=AOvVaw14aNGDcmgKndduxcjAR05v

References

1. Oh Haekwan, Kim Geunyoung, Seo Hyunwoo, Song Yotak, Lee Keekeun, Yang Sang Sik. Fabrication of microlens array using quartz wet etching and polymer. *Sensors and Actuators A: Physical*, 2010, vol.164, pp. 161-167.
2. Nussbaumyx Ph., Völkely R., Herzigy H. P., Eisnerz M., Haselbeckz S. Design, fabrication and testing of microlens arrays for sensors and microsystems. *Pure Applied Opt.* 6 (1997), pp. 617-636.
3. Körner T. O., Gull R. Combined optical/electrical simulation of CCD cell structures by means of the finite-difference time-domain method. *IEEE Transactions on Electron Devices*, 2000, vol. 47, iss. 5, pp. 931-938.
4. Satoh T. et al. Optical limitations to cell size reduction in it-CCD image sensors. *IEEE Transaction Electron Devices*, 1997, vol. 44, pp. 1599-1603.
5. Mutoh H. Simulation for 3-D optical and electrical analysis of CCD. *IEEE Transaction Electron Devices*, 1997, vol. 44, pp. 1604-1610.
6. Sentaurus TCAD. Industry-standard process and device simulators, available at: https://www.google.ru/url?sa=t&rct=j&q=&esrc=s&source=web&cd=&ved=2ahUKEwiL-dr5zYPqAhUeAhAIHXUeB9QQFjAAegQIARAB&url=https%3A%2F%2Fwww.synopsys.com%2Fcontent%2Fdam%2Fsynopsys%2Fsilicon%2Fdatasheets%2Fsentaurus_ds.pdf&usg=AOvVaw14aNGDcmgKndduxcjAR05v