

TCAD-модель фотоприемной ПЗС-ячейки с вертикальным антиблумингом

Е.В. Костюков., М.А. Пospelова, А.А. Пугачёв

Федеральное государственное унитарное предприятие «Научно-производственное предприятие «Пульсар»,

pugachev@pulsarnpp.ru

Аннотация — TCAD-модель фотоприемной ПЗС-ячейки с вертикальным антиблумингом включает в себя описание областей моделирования, временной последовательности управляющих напряжений и методики-стратегии расчета набора свет-сигнальных характеристик для каждого режима работы ячейки. Методики расчета свет-сигнальных характеристик позволяют определить и оптимизировать зарядовую емкость, кратность антиблуминга, динамический диапазон. С помощью созданной TCAD-модели получены зависимости эффективности антиблуминга от параметров профиля легирующих примесей и топологии. Разработаны методы для снижения временных затрат на моделирование.

Ключевые слова — TCAD-модель, ФПЗС, вертикальный антиблуминг.

I. ВВЕДЕНИЕ

В настоящее время ФГУП «НПП «Пульсар» проводит разработки ряда фотоприемных БИС на приборах с зарядовой связью (ПЗС), фотоприемные ячейки которых оснащены устройствами антиблуминга. Устройство антиблуминга при высоких уровнях входной освещенности отводит в подложку избыточный фотогенерированный заряд из фотоприемных ячеек, исключая его перетекание в соседние ячейки [1]. Устранение эффекта растекания избыточного заряда позволяет расширить динамический диапазон фотоприемных ПЗС СБИС (ФПЗС) и улучшить качество изображения. ФПЗС с устройством антиблуминга востребованы для создания телевизионных систем с широким динамическим диапазоном и работающих в сложных световых условиях.

Существуют два варианта конструктивного решения устройства антиблуминга в фотоприемной ячейке, называемые планарным и вертикальным антиблумингами соответственно. Сток планарного антиблуминга (ПАБ) лежит в одной плоскости с областью фотодиода, что отнимает часть площади фотоприемной ПЗС-ячейки и, тем самым, снижает ее фоточувствительность. Сток вертикального

антиблуминга (ВАБ) лежит под областью фотодиода, что повышает фоточувствительность ячейки с ВАБ по сравнению с ячейкой с ПАБ при равных площадях ячеек.

На рис. 1 схематично изображена структура ПЗС-ячейки с вертикальным антиблумингом.

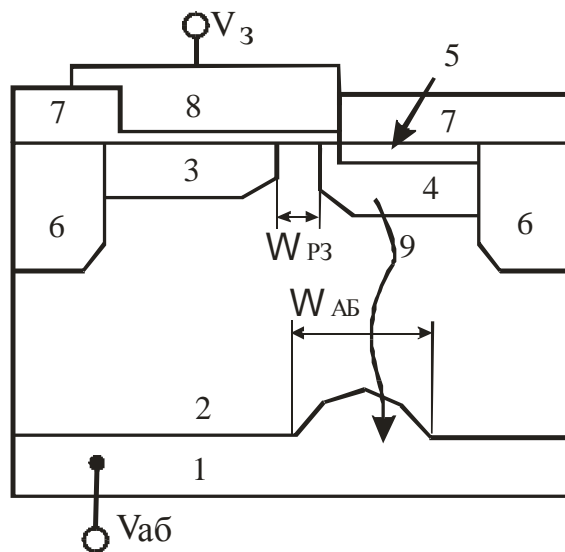


Рис. 1. Структура ПЗС-ячейки с вертикальным антиблумингом

На рис. 1 обозначены: 1 - n-подложка, 2 - профилированный p-карман, 3 - n-вертикальный регистр, 4 - n-область фотодиода, 5 - p++-область фотодиода, 6 - p-стоп-каналы, 7 - диэлектрик, 8 - разрешающий затвор, 9 - направление потока избыточных электронов из фотодиода в подложку, $W_{pз}$ - ширина области разрешающего затвора, $W_{аб}$ - ширина области стока антиблуминга. Толщина подложки 1 составляет порядка 400 – 600 мкм, толщина области p-кармана - 3 – 6 мкм. Сток избыточного заряда происходит из области ФД 4 через узкую часть области p-кармана 2 в подложку 1.

Профилированный р-карман 2 получают за счет эффекта бокового смыкания близлежащих диффузионных областей р-типа. Определение оптимального расстояния между окнами для ионной имплантации областей р-кармана и параметров его легирования является ключевой задачей проектирования ПЗС-ячейки с вертикальным антиблумингом.

ПЗС-ячейка с ВАБ имеет сложную тактовую диаграмму управляющих напряжений, которая обеспечивает ее работу в следующих пяти режимах: накопление заряда в фотодиоде с режимами стока избыточного заряда (режим антиблуминга) и без него; перенос заряда из фотодиода в ячейку вертикального регистра (параллельный перенос); хранение заряда в ячейке вертикального регистра; перенос заряда по вертикальному регистру (вертикальный перенос); режим электронного затвора.

Также очень сложным и многостадийным является технологический маршрут изготовления ФПЗС с ВАБ, который может включать до 19-ти операций фотолитографии.

Проектирование ПЗС – это, прежде всего, технологическое проектирование: зачастую, сравниваются и анализируются десятки вариантов конструкторско-технологических решений одной фотоприемной ячейки. Процесс проектирования фоточувствительных ПЗС СБИС имеет и ряд других особенностей, значительно отличающих его от процессов проектирования СБИС других классов [2]:

- проектирование ПЗС СБИС идет по схеме «фотоприемная ячейка – матричный массив ячеек», причем основным по трудозатратам и ответственности является этап технологического проектирования фотоприемной ячейки;
- необходимость учета большого числа ограничений, накладываемых не только технологией, но и непосредственно задачей приема изображения, то есть характеристиками входного сигнала;
- обязательными этапами автоматизированного проектирования являются технологическое и приборное моделирование;
- нет этапа схематехнического моделирования при проектировании матричного массива фотоприемных ячеек;
- отсутствуют «стандартные» библиотеки фотоприемных ячеек ПЗС и, соответственно, нет средства автоматизированного проектирования ПЗС с помощью библиотек.

Особенности процесса проектирования ФПЗС ВАБ вкуче со сложностями технологии изготовления и многостадийностью работы ПЗС-ячейки приводят, соответственно, к проблемам моделирования. Ключевой из них является приведение временных затрат к объемам, пригодным для применения

моделирования в цикле практического проектирования.

II. РАЗВИТИЕ СРЕДСТВ И МЕТОДИК МОДЕЛИРОВАНИЯ ПЗС-ЯЧЕЕК

A. Быстрое моделирование без применения TCAD

В течение длительного (более 25 лет) срока при разработке фотоприемных ячеек применяется программный комплекс быстрого приборно-технологического моделирования ПЗС «САПР ПЗС» [2]. В комплекс входят программы быстрого численно-аналитического расчета профилей легирующих примесей и расчета двумерных распределений потенциала и заряда на основе Пуассон-анализа. Такой подход обеспечивает не более 1-2 часов общих временных затрат на расчет одного варианта ячейки при заданных параметрах техпроцесса и топологии для всех 5 режимов работы. При этом используемый алгоритм задания граничных условий дает возможность анализировать «плавающие» диффузионные области в состоянии неравновесного обеднения, что особенно важно при моделировании ПЗС-ячейки с ВАБ. Однако, с переходом на новые технологические процессы и уменьшением площадей ячеек с ВАБ, становятся принципиальными ограничения данного комплекса:

- упрощенные модели технологических процессов;
- небольшое - не более 4000 - число узлов конечно-разностной сетки для дискретизации модели структуры ячейки;
- отсутствие динамических моделей токов фотогенерации и подвижных носителей заряда.

Ограничение по числу узлов разностной сетки частично преодолено путем добавления в цикл моделирования этапа разработки модели структуры [3]. На этом этапе с помощью расчетных экспериментов с различными вариантами модели структуры ПЗС-ячейки выбираются границы области моделирования и подбирается конечно-разностная сетка. В результате, несмотря на некоторое увеличение временных затрат, достоверность результатов моделирования возрастет. Но упрощенные модели технологического процесса не позволяют моделировать форму поверхности после операций окисления и травления, что становится неприемлемым для создания ячеек с размерами менее $10 \times 10 \text{ мкм}^2$.

B. TCAD-моделирование методом Пуассон-анализа

Применение средств комплекса приборно-технологического моделирования Sentaurus TCAD (Synopsys) сняло проблему моделирования технологических процессов. Для сохранения приемлемых временных затрат были предложены методы моделирования ПЗС-ячеек различных конструкций на основе стационарного Пуассон-анализа и на основе уже отработанных методов моделирования с помощью САПР ПЗС [2]. Однако, не удалось разработать алгоритма моделирования «плавающих» диффузионных областей в состоянии

неравновесного обеднения, и введение в модель структуры нескольких дополнительных диффузий для контактов к таким областям снижало достоверность результатов и часто сводило на нет применение сложных моделей технологических процессов [2]. Данный подход имел ограниченное применение [4], но в результате позволил разработать метод моделирования ПЗС-ячеек средствами TCAD для решения нестационарных уравнений полупроводниковых приборов.

С. Нестационарная TCAD-модель ПЗС-ячеек

Нестационарная TCAD-модель стала третьим шагом в последовательности математических моделей ПЗС. При разработке нестационарной TCAD-модели были решены следующие задачи:

- разработан алгоритм задания начальных условий для моделирования «плавающих» диффузионных областей в режиме их полного обеднения;
- разработаны временные диаграммы управляющих напряжений для всех режимов работы ПЗС-ячеек с вертикальным антиблумингом;
- разработаны методики расчета свет-сигнальных характеристик (ССХ) ПЗС-ячеек.

Свет-сигнальная характеристика устанавливает связь между входным оптическим сигналом и накапливаемым информационным зарядом. Как правило, применяются два вида ССХ: зависимость заряд — освещенность при заданном времени экспозиции или зависимость заряд — время экспозиции при заданном уровне входной освещенности. Разработанная модель позволяет на основе построения различных вариантов ССХ оценить все основные параметры ПЗС-ячеек с ВАБ при приемлемых временных затратах.

III. ОСНОВНЫЕ ЭЛЕМЕНТЫ TCAD-МОДЕЛИ ПЗС-ЯЧЕЕК

А. Модель структуры ПЗС-ячейки

Модель структуры ПЗС-ячейки с вертикальным антиблумингом приведена на рис. 1. Данная модель соответствует структуре ПЗС-ячейки в плоскости сечения, проходящей перпендикулярно поверхности кремния по области разрешающего затвора. Боковые границы модели уточняются по методике, разработанной для модели стационарного Пуассон-анализа [3]. Уточнение конечно-элементной сетки проводится в областях, охватывающих объем кремния под разрешающим затвором, а также в области стока антиблуминга в месте смыкания областей Р-карманов, рис. 1. В случаях, когда топология или структура ячейки будут обладать значительной несимметрией, в модель структуры включаются фрагменты соседних по матричной строке ячеек, что ведет к повышению достоверности результатов при неизбежном возрастании временных затрат.

В. Система уравнений

В математическую модель входят следующие уравнения:

- уравнение Пуассона;
- нестационарное уравнение непрерывности для электронов (включая токи фотогенерации (Ф/Г));
- уравнение тока фотогенерации.

Включение в систему уравнения непрерывности для дырок нецелесообразно, так как в фотоячейке отсутствуют как токи дырок, так и области накопления дырок, образующих информационный заряд.

С. Начальные и граничные условия

Начальное приближение должно соответствовать состоянию прибора перед началом стадии накопления фотогенерированного заряда. Момент начала накопления — это режим так называемого «полного обеднения» областей регистра и фотодиода ячейки. Соответственно, начальные значения управляющих напряжений подобраны так, чтобы обеспечить корректное моделирование стадии полного обеднения и обеспечить сходимость при переходе от начального приближения к основной стадии моделирования.

Начальное распределение потенциала определяются решением уравнения Пуассона, при этом концентрации подвижных носителей вычисляются исходя из начального приближения квазиуровней Ферми для данного режима при отсутствии входного светового потока.

Граничные условия соответствуют общепринятым для двумерного моделирования полупроводниковых приборов, а сами границы области моделирования выбираются на этапе разработки модели структуры ПЗС-ячейки.

Д. Задание входного светового сигнала

Входной световой сигнал представляет собой монохроматическое излучение с заданными величинами плотности мощности на поверхности кремния и длины волны. В момент расчета начального приближения входное излучение отсутствует. На основной стадии моделирования после небольшого интервала времени порядка 50 нс мощность входного сигнала линейно нарастает от нуля до заданной за интервал времени 20-50 нс и далее остается неизменной до окончания временного интервала моделирования. Область на поверхности кремния, на которую «падает» входное излучение, может быть задана двумя способами: по всей поверхности области моделирования для ячеек без алюминиевого экрана или только по заданной области в ФД, эквивалентной окну в экране.

Величина плотности мощности входного потока излучения может задаваться, по крайней мере, в двух вариантах:

- порядка $10^{-6} — 10^{-2}$ Вт/см² при построении ССХ для реальных входных потоков и исследований работы антиблуминга;

- порядка $1 - 10 \text{ Вт/см}^2$ при быстром расчете зарядовых емкостей областей регистра и фотодиода.

Указанные величины мощностей соответствуют уровням освещенности на поверхности кремния порядка $0.1 - 10000$ люкс.

Е. Задание управляющих напряжений

В модель структуры входят электроды разрешающего затвора (РЗ), стока антиблуминга — подложки (АБ) и контакта к р-карману в области стоп-канала. Формально контакт к р-карману расположен вне области моделирования, но р-карман объединен с областью стоп-канала, что делает корректным расположение данного электрода в области стоп-канала. Р-карман находится под постоянным потенциалом (как правило, нулевым), поэтому временные диаграммы задаются только для напряжений электродов РЗ и АБ и для мощности входного потока излучения.

Ф. Рассчитываемые характеристики и параметры

С помощью разработанной модели могут быть смоделированы все основные процессы в ПЗС-фотоприемной ячейке с ВАБ. Соответственно, могут быть исследованы и рассчитаны все параметры и характеристики и их зависимости от параметров технологии, топологии и управляющих напряжений.

Разработаны методики моделирования и исследования процессов протекания потоков фотогенерированных электронов в режимах: накопление в ФД; накопление в ФД с режимом стока в антиблуминг; параллельный перенос из ФД в регистр; электронный затвор. Результаты моделирования данных процессов позволяют исследовать:

- изменение распределения потенциала во времени, что позволяет определить основные электрические характеристики ячейки;
- «утечку» электронов в регистр в режиме накопления, т.е. «смаз» изображения при накоплении кадра;
- «утечку» электронов в область подложки при переносе заряда из ФД в регистр, т.е. «смаз» изображения при параллельном переносе;
- потоки носителей между соседними фотоприемными ячейками при высоких уровнях мощности входного потока, т.е., «смаз» изображения при переэкспозиции.

Г. Рассчитываемые характеристики

С помощью построенных свет-сигнальных характеристик могут быть рассчитаны следующие электрические характеристики и параметры ПЗС с ВАБ:

- зарядовые емкости фотодиода и ячейки вертикального регистра $Q_{ФД}$ и $Q_{РГ}$, соответственно;

- кратность (эффективность) антиблуминга $K_{АБ}$;
- динамический диапазон ДД;
- оптимальные управляющие напряжения: затвора при параллельном переносе $V_3^{ПП}$, подложки в режиме накопления $V_{П}^{НАК}$ и подложки в режиме электронного затвора $V_{П}^{ЭЗ}$;
- пробивное напряжение р-п-переходов регистр-стоп-канал и фотодиод-стоп-канал;
- неэффективность параллельного переноса $\epsilon_{ПП}$;
- квантовая эффективность ячейки по монохроматическому сигналу K_{λ} .

Построение в требуемые моменты времени распределений пространственных потоков электронов радикально расширило возможности оптимизации фотоприемной ячейки. Может быть рассчитан ряд важных зависимостей, помогающих оптимизировать структуру, технологию и управление фотоприемной ячейки, например:

- зависимость $Q_{ФД}$, $Q_{РГ}$ и $V_3^{ПП}$ от ширины области разрешающего затвора $W_{РЗ}$ (рис. 1), оптимизация $W_{РЗ}$ по критерию отсутствия «смаза» изображения;
- зависимость $Q_{ФД}$, $Q_{РГ}$ и $V_{П}^{НАК}$ от ширины области стока антиблуминга $W_{АБ}$ (рис. 1), оптимизация $W_{АБ}$ по критерию отсутствия «смаза» изображения;
- зависимости величин смаза изображения от длины волны входного оптического сигнала.

Возможность исследования процесса накопления во времени также позволяет определить ограничения по экспозиционным параметрам мощности и продолжительности входного сигнала по критериям работоспособности ПЗС-ячейки, принципиально недоступным для моделей на основе Пуассон-анализа.

IV. ПРИМЕРЫ РЕЗУЛЬТАТОВ МОДЕЛИРОВАНИЯ

Как было указано, свет-сигнальная характеристика устанавливает связь между входным оптическим сигналом и накапливаемым информационным зарядом. Как правило, применяются два вида ССХ: зависимость заряд — освещенность при заданном времени экспозиции или зависимость заряд — время экспозиции при заданном уровне входной освещенности. Такие характеристики для ячейки с ВАБ исследуются, например, в [5] [6]. Данные характеристики дают много информации, но их построение с помощью двумерной нестационарной модели требует длительного — единиц и даже десятков часов — процессорного времени. На рис. 2 представлена ССХ типа «заряд (в условных единицах) — время накопления» для различных уровней плотности мощности входного сигнала, на рис. 3 — ССХ типа «заряд — плотность мощности входного сигнала» для различных времен накопления.

Эффект «включения» антиблуминга хорошо виден как начало выхода кривых на горизонтальный участок

для ССХ рис. 2 или на участок с малым градиентом для ССХ рис. 3. Динамический диапазон легко определяется по линейному участку характеристик.

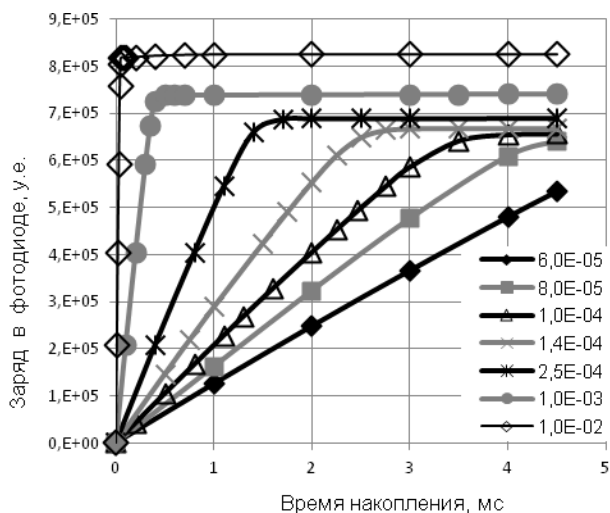


Рис. 2. Свет-сигнальные характеристики типа «заряд-время накопления» для ПЗС-ячейки с вертикальным антиблумингом при разных плотностях мощности входного сигнала ($Вт/см^2$)

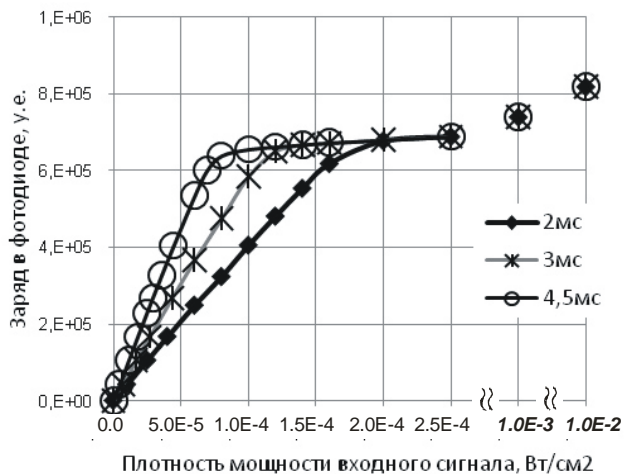


Рис. 3. Свет-сигнальные характеристики типа «заряд-плотность мощности» для ПЗС-ячейки с вертикальным антиблумингом при разных временах накопления (мс)

При исследовании влияния на накопление заряда в фотоприемной ячейке таких факторов, как мощность и длина волны излучения, время накопления заряда, напряжение на подложке, а также топологических и структурных параметров ячейки необходимо построить большое число различных ССХ. Существенно сокращает число рассчитываемых зависимостей построение ССХ в осях «сигнальный заряд – плотность энергии облучения (произведение плотности мощности облучения на время накопления)» для разных значений плотности мощности облучения в качестве параметра. В этих

координатах (рис. 4) линейные участки для всех кривых для каждого из напряжений стока антиблуминга совпадают, а различаются только нелинейные участки.

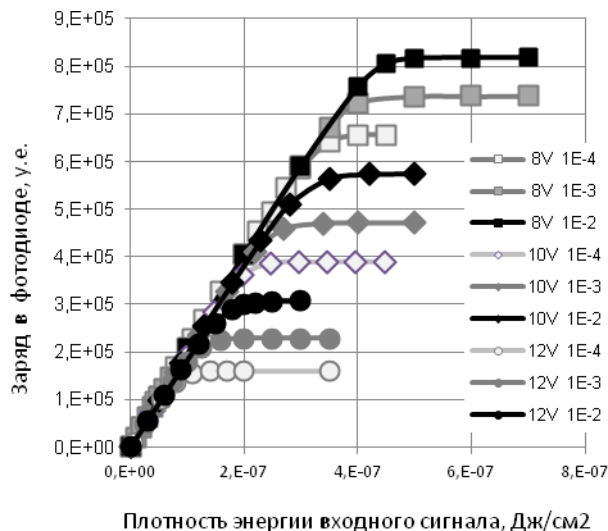


Рис. 4. Свет-сигнальные характеристики типа «заряд-плотность энергии» для ПЗС-ячейки с вертикальным антиблумингом при разных напряжениях на подложке и разных плотностях энергии входного сигнала ($Дж/см^2$)

Из ССХ рис. 4 могут быть получены различные варианты ССХ в осях «заряд-время» и «заряд-входная мощность». Такой подход позволяет в несколько раз – до уровня единиц часов – сократить временные затраты.

На рис. 5 приведен пример двумерного распределения плотности токов электронов в режиме накопления. Данное распределение демонстрирует наличие утечки электронов из фотодиода в регистр при активно работающем стоке антиблуминга. Для представленного примера получено, что за время накопления 10 миллисекунд в регистр попадет порядка 40 электронов, что для ячейки с данными размерами превышает шум темнового тока и, следовательно, является неприемлемым фактом. Устранить утечку можно увеличением ширины области разрешающего затвора (рис. 1), увеличением концентрации примеси р-кармана либо увеличением запирающего напряжения на разрешающем затворе. В процессе проектирования проверяется несколько возможных вариантов и по анализу распределений потенциала, концентраций и токов подвижных носителей заряда выбирается конструкторско-технологическое решение, удовлетворяющее совокупность всех требований к характеристикам отдельной ячейки и матрицы в целом. Такой перебор, как уже отмечалось, требует проведения десятков циклов моделирования «технология – электрические характеристики» ПЗС-ячейки.

На рис. 6. даны зависимости зарядов в фотодиоде и регистре от ширины области разрешающего затвора в

момент окончания стадии накопления длительностью 10 миллисекунд.

Данные зависимости позволяют выбрать минимальную ширину области РЗ, равную 1,7 мкм, тем самым максимизируя долю площади области фотодиода в ячейке и, соответственно, максимизируя ее фоточувствительность.

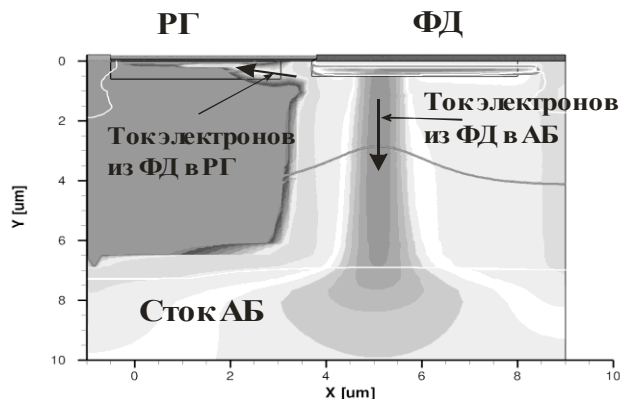


Рис. 5. Распределение плотности тока электронов, демонстрирующее утечку электронов из ФД в РГ в режиме накопления

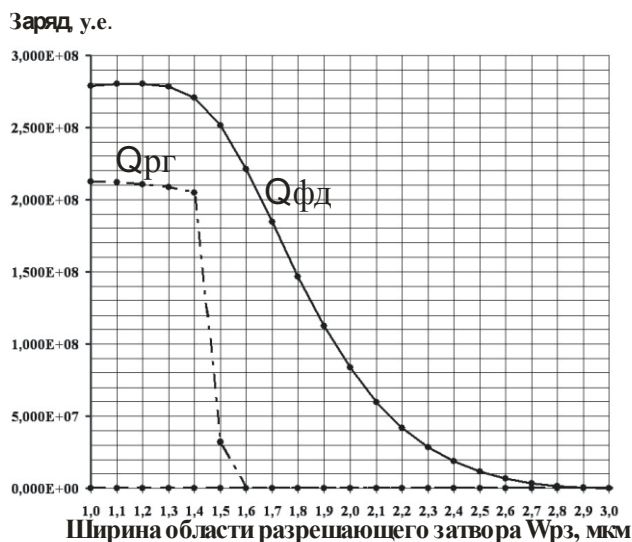


Рис. 6. Зависимости величин зарядов в фотодиоде Qfd и регистре Qrg от ширины области разрешающего затвора

V. ПЕРСПЕКТИВНЫЕ ЗАДАЧИ

Наиболее перспективной задачей, которую можно решить с привлечением средств многомерного приборно-технологического моделирования, является построение модели, устанавливающей связь разрешающей способности фотоприемной матрицы с параметрами технологии и топологией ее фотоприемных элементов [7]. Такая модель будет сочетать приборно-технологические модели и модели выборки двумерных изображений. Для ее создания

требуется тщательная проработка методов моделирования фотоприемных ячеек.

VI. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

ФПЗС с вертикальным антиблумингом давно имеют широкое применение, однако библиография по тематике их TCAD-моделирования крайне ограничена. Ряд ведущих компаний использует САПР SILVACO [8], имеющую специальные возможности для моделирования ПЗС. По-видимому, TCAD в версиях ISE применяется компанией E2V Technologies (Великобритания) [9], но информация в открытой печати по этому вопросу фактически отсутствует.

Разработанная модель и методики впервые позволяют моделировать элементы фоточувствительных СБИС на приборах с зарядовой связью средствами TCAD (Synopsys) с полным охватом проблем реального проектирования.

ЛИТЕРАТУРА

- [1] M.J.H. Van De Steeg, H.L. Peek et al. A Frame-Transfer Color CCD-Imager with Vertical Antiblooming. // IEEE Transactions on Electron Devices, August 1985, VOL. ED-32. NO. 8. P. 1430-1438.
- [2] Пугачев А.А., Кушнир А.А., Маклакова О.М. TCAD-моделирование элементов фоточувствительных ПЗС СБИС // Проблемы разработки перспективных микро- и нанoeлектронных систем – 2008. Сборник научных трудов // под общ. ред. А.Л.Стемпковского. – М.:ИППМ РАН, 2008. – С. 189-194
- [3] Пугачев А.А., Тубаев А.А. Двумерные модели структур фотоприемных ячеек с устройством антиблуминга // Твердотельная электроника. Сложные функциональные блоки РЭА // Материалы научно-технической конференции. - М.:МНТОРЭС им. А.С. Попова. - 2010. - С.141-142.
- [4] Пугачев А.А., Певцов Е.Ф., Рябев А.Н. Методики моделирования и оптимизации электрических характеристик выходного ПЗС-регистра со скрытым каналом // Электронная техника. Серия 2. Полупроводниковые приборы. - М., 2011. – Вып. 2. - С. 37–43
- [5] Stevens E.G. Photoresponse Nonlinearity of Solid-State Image Sensor with Antiblooming Protection // IEEE Transactions on Electron Devices. - 1991. - V. 38. - № 2. - P. 299 – 302.
- [6] Stevens E.G., Yung-Rai Lee, Burkey B.C. The Effect of Smear on Antibloomig Protection and Dynamic Range of Interline CCD Image Sensor // IEEE Transactions on Electron Devices. - 1992. - V. 39. - № 11. - P. 2508 – 2514.
- [7] Пугачев А.А., Осочкин С.С. Физико-топологическое моделирование функции передачи модуляции фоточувствительных СБИС // Проблемы разработки перспективных микрoeлектронных систем – 2006. Сборник научных трудов/ под общ. ред. А.Л.Стемпковского. – М.: ИППМ РАН, 2006. – С. 648-653.
- [8] <http://www.silvaco.com/content/kbase/luminous.pdf>
- [9] <http://www.e2v.com/products-and-services/>