Моделирование методом Монте-Карло поведения частотно-контрастной характеристики фотоприёмных КРТ-матриц вблизи удвоенной частоты Найквиста

А.В. Вишняков, В.А. Стучинский

Институт физики полупроводников им. А.В. Ржанова, Новосибирск,

630090, пр. Академика Лаврентьева, 13

тел: + 7 (383) 330-10-82, факс: + 7 (383) 330-10-82, эл. почта: vishn@isp.nsc.ru

DOI 10.34077/RCSP2021-134

Частотно-контрастная характеристика (ЧКХ) ИК КРТ-фотоприёмных матриц убывает с ростом пространственной частоты засветки и обычно проходит через ноль вблизи удвоенной пространственной частоты Найквиста $2f_N$ равной обратному шагу матрицы. Если аппроксимировать фоточувствительность пикселя константой в пределах квадрата со стороной w , меньшей или равной шагу матрицы, и нулем – за пределами этого квадрата, то ЧКХ такой площадки равна $\sin(\pi fw)/\pi fw$ (f – пространственная частота) и проходит через первый ноль на частоте $f=1/w$, равной или большей $2f_N$. Как видно из рисунка, на частоте $2f_N$ распределение интенсивности синусоидальной волны засветки и соответствующие ему концентрация и ток фотоносителей обладают симметрией относительно границ пикселя, так что нормальная компонента фототока через границы пикселей зануляется. Поэтому имеют место и могут быть использованы простые соображения баланса фотоносителей. Фотоносители собираются на p - n -переход и дают вклад в сигнал с расстояний, не больших приблизительно длины диффузии L_d от ближайшей точки p - n -перехода. Если длина диффузии носителей заряда ($N3$) превышает расстояние от края p - n -перехода до границы пикселя, то площадь сбора заряда совпадает с пикселем, - и вклады положительной и отрицательной полуволн засветки полностью приходят на p - n -переход и гасят друг друга. С уменьшением длины диффузии область сбора заряда уменьшается в размере и приближается к границам p - n -перехода; при этом отрицательная часть полуволны сигнала частично теряется (так как она расположена дальше от пикселя, чем положительная часть), - и в результате на пикселе возникает положительный результирующий сигнал, то есть при уменьшении длины L_d ЧКХ матрицы возрастает.

Нами было проведено численное моделирование поведения ЧКХ КРТ матрицы с архитектурой n -на- p и размером пикселя 15×15 мкм вблизи частоты $2f_N$. Диффузия фотоносителей из узкого линейного пятна засветки моделировалась методом Монте-Карло как случайное блуждание частиц по кубической сетке. Как показывают результаты моделирования, значение ЧКХ на частоте $2f_N$ растёт с уменьшением площади сбора, то есть с уменьшением длины диффузии $N3$ и размеров p - n -перехода. ЧКХ на частоте $2f_N$ изменяется с длиной диффузии как $1/L_d^2$. Реализация такой зависимости следует также и из разработанной нами грубой одномерной аналитической модели. Если площадь p - n -перехода мала, то площадь сбора фотоносителей уменьшается, что приводит к потере части сигнала в первую очередь отрицательной полуволны; кривая ЧКХ при этом сдвигается вверх, - и ноль ЧКХ может исчезнуть. С ростом толщины слоя абсорбера значение ЧКХ на частоте $2f_N$ уменьшается.

Вместе с рассмотренным выше вкладом от фотогенерации электронов в p -области абсорбера, заметный вклад в формирование фотосигнала пикселя может давать также и фотогенерация носителей заряда в n -области p - n -перехода (несмотря на малый объём этой области и поглощение света в p -абсорбере). С уменьшением площади сбора носителей в p -области ЧКХ($2f_N$) изменяется в сторону более положительных значений, при уменьшении сбора фотоносителей в n -области ЧКХ - становится более отрицательной.

Рис. 1. Распределение фотоносителей в матрице на удвоенной частоте Найквиста. Волна засветки направлена по горизонтали. Знаками + и - обозначены фотоносители в p -области (электроны) для положительной и отрицательной полуволн засветки.