INSTRUMENTATION AND TECHNOLOGICAL MODELING OF SILICON MULTIPIXEL APD OF VISIBLE AND NEAR IR SPECTRUM RANGE

V. V. Malyutina-Bronskaya[1], S. A. Soroka[1], A. M. Lemeshevskaya[2], V. S. Tsymbal[2], A. B. Smirnov[2], I. A. Najem[2]

[1)] State Scientific and Production Association "Optics, Optoelectronics and Laser Technology", Nezavisimosti Ave., 68-1, 220072 Minsk, Belarus,
[2)] JSC "Integral" - "Integral" holding managing company ", Kazintsa I.P. st., 121A, 220108 Minsk, Belarus
Corresponding author: V. V. Malyutina-Bronskaya (e-mail: malyutina@oelt.basnet.by)

Using the TCAD Synopsys software solution, device characteristics and technological modeling of a pixel of a multipixel avalanche photodiode of the visible and near infrared spectrum ranges was carried out. Based on the results of technological modeling of a pixel on different epitaxial films 4KEF0.8 and 6KEF1.5, the following were obtained: vertical pixel structure and doping profiles. Based on the results of device characteristics modeling on different epitaxial films 4KEF0.8 and 6KEF1.5, the breakdown voltage values depending on the doping dose of the anode pocket, pixel capacitance values were obtained; the reflectivity for the antireflection coating and spectral sensitivity maxima for different epitaxy were determined.

Key words: modeling; silicon avalanche photodiode; electrical characteristics; spectral characteristic.

ВВЕДЕНИЕ

Фотоприёмники – полупроводниковые приборы, регистрирующие оптическое излучение и преобразующие оптический сигнал на входе в электрический сигнал на выходе фотодетектора. Способность обнаруживать одиночные фотоны представляет собой конечную цель оптического обнаружения. Мультипиксельные лавинные фотодиоды (МП ЛФД) видимого и ближнего инфракрасного (ИК) диапазонов спектра являются важными элементами современной оптоэлектроники, их применение находится во многих областях, таких как научные исследования, медицинская диагностика, а также в промышленности. Они обладают высокой чувствительностью, высоким коэффициентом усиления, а также быстрым временем отклика.

Принцип работы кремниевых МП ЛФД основан на требовании информации о точном определении времени прихода и плотности очень низкого потока фотонов. Из-за квантовой природы света низкий поток фотонов состоит из нескольких фотонов, распределенных во времени и пространстве. Плотный массив распределенных в пространстве микроустройств (пикселей), индивидуально способных определять время прибытия отдельного фотона, может, в принципе, определять распределение падающих фотонов по времени и пространству. В МП ЛФД пиксели электрически соединены параллельно, образуя матрицу из $n \times m$ соседних датчиков. Каждый пиксель, известный в литературе как однофотонный лавинный диод (SPAD) или лавинный фотодиод в режиме Гейгера (GM-APD), состоит из p–n-перехода, легированного соответствующим образом, чтобы обеспечить лавинный пробой в четко определенной активной области, и с интегрированным последовательно «гасящим» сопротивлением. Активная область формируется путем создания обогащенной зоны, обычно

легированной ионной имплантацией с последующей термической обработкой для активации легирующей примеси и отжига дефектов. Это локальное обогащение легирующей примесью формирует области *p*–*n*-переходов, где электрическое поле перехода выше, и они становятся активными областями пикселя для обнаружения фотонов. Эти *p*–*n*-переходы работают в режиме Гейгера, то есть они смещены выше напряжения пробоя перехода ($U_{пр}$) [1].

Технология изготовления конструкций ЛФД очень сложна, а требования к качеству и повторяемости процессов чрезвычайно высоки и нестандартны. Технологический процесс должен обеспечивать, прежде всего, достижение заданных расчетных параметров и особенно это касается точности получения соответствующих распределений концентрации примесей в лавинной области. Технологический процесс должен не разрушать структуру и не вносить нежелательные примеси, напряжения или неравномерность. Это требует решения многих задач, в том числе связанных с обработкой высокоомного кремния, формированием качественных спаев больших площадей и др. Технология изготовления ЛФД структур определяет, прежде всего, поверхностную однородность лавинного пробоя, уровень темновых токов фотодиода и значений его шумовых токов [2].

Целью работы было проведение приборно-технологического моделирования пикселя кремниевых МП ЛФД видимого и ближнего ИК диапазонов для оптимизации технологических параметров пикселя ЛФД, профиля легирования. На основании технологического моделирования предложена вертикальная типовая структура элементов с контрольными толщинами (глубинами) конструктивных слоев; разработан технологический маршрут изготовления экспериментальной партии образцов линейки кремниевых МП ЛФД.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Методология работы включала в себя приборно-технологического моделирования с помощью программного комплекса Taurus TCAD Synopsys пикселя со следующими выходными параметрами пикселя: выбором подложки и эпитаксиальной пленки; профилями концентрации примеси в *p*–*n*-переходе под пикселем; максимальной и поверхностной концентрациями в конструктивных слоях; концентрацией примеси в области *p*–*n*-перехода пикселя; глубиной залегания конструктивных слоев; поверхностным сопротивлением конструктивных слоев; величиной области распространения пространственного заряда в эпитаксиальную пленку, в которой происходит генерация носителей заряда при попадании единичного фотона; напряжением лавинного пробоя пикселя; локализацией места лавинного пробоя в области плоского *p*–*n*-перехода; распределением напряженности электрического поля в области *p*–*n*-перехода пикселя; определением емкости пикселя на рабочем напряжении; выбором просветляющего покрытия с минимальным коэффициентом отражения; расчетом спектральной чувствительности в диапазоне длин волн λ от 350 до 100 нм и определением пиковых значений спектральной чувствительности и длины волны, SiФЭУ может быть изготовлен как на структуре типа P-на-N, так и типа N-на-P.

Поскольку электроны имеют более высокую вероятность инициирования лавины, чем дырки, более высокая эффективность может быть достигнута, когда начальный фотон взаимодействует в слое *p*-типа. Это максимизирует поток электронов через область лавины с высоким полем. Поэтому, чтобы максимизировать чувствительность к фотонам с более короткой длиной волны (синий диапазон длин волн), струк-

тура P-на-N более эффективна, в то время как структура N-на-P может обеспечить лучшую чувствительность к фотонам с более длинной длиной волны (зелено-красный диапазон длин волн).

Вертикальная структура пикселя МП ЛФД площадью 35×35 мкм^2 представлена на рисунке 1. Размер моделируемой структуры составляет по оси X – 40 мкм (пиксель 35 мкм и зазор между пикселями 5 мкм), по оси Y – 6 мкм для эпитаксии: 4КЭФ0,8 и 8 мкм для эпитаксии 6КЭФ1,5. Для нахождения оптимального режима легирования N-кармана для обеспечения требуемого пробивного напряжения пикселя, которое составляет от 25 до 35 В, был проведен план эксперимента для разных вариантов эпитаксии: 4КЭФ0,8 и 6КЭФ1,5.

Приборное моделирование проводилось в программном модуле Medici комплекса TCAD после обозначения электродов конструктивным слоям прибора.

Для оценки работоспособности ФЭУ проводится моделирование следующих характеристик: вольт-амперных характеристик (ВАХ), пробивных напряжений (локализация места пробоя, определение ширины ОПЗ, распределение электрического поля), а также проверка изоляции между пикселями; ёмкости пикселя (оценка быстродействия ФЭУ); спектральных характеристик. Измерение ВАХ проводилось по схеме, приведенной на рисунке 2.

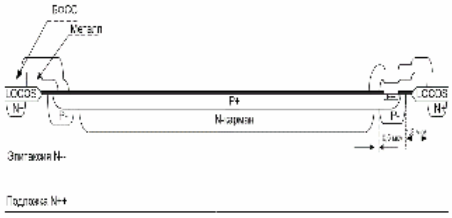


Рис. 1. Вертикальная структура пикселя МП ЛФД

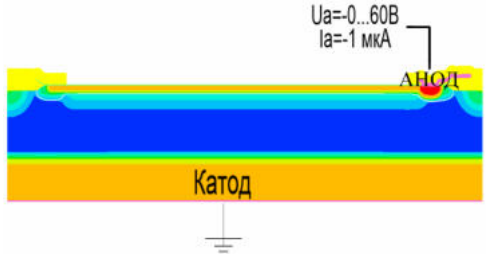


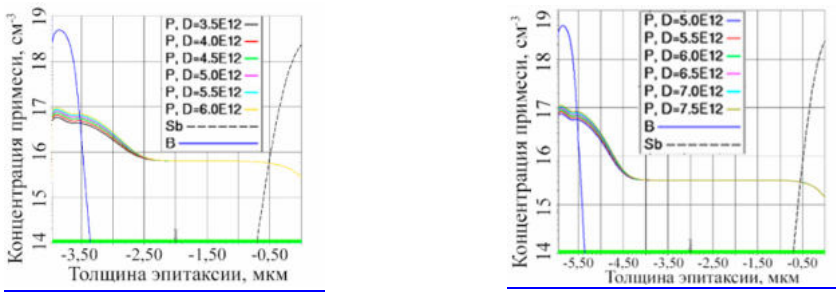
Рис. 2. Схема измерения ВАХ МП ЛФД в представлении TCAD

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

На рисунке 3 представлено моделирование профилей легирования примесей фосфора (P) в пикселе при разных дозах в карман для разных вариантов эпитаксии: 4КЭФ0,8 и 6КЭФ1,5 для нахождения оптимального режима легирования N-кармана для обеспечения требуемого пробивного напряжения. Доза в карман варьируется $D = (3{,}5–6{,}0)\cdot10^{12}$ ион/см^2 с энергией $E = 300$ кэВ.

Для легирования анода была выбрана примесь BF2, для обеспечения мелкого p–n-перехода с целью улучшения фото характеристик и возможности детектирования в УФ области света.

Было проведено приборное моделирование пробивного напряжения ВАХ. Анализ зависимостей пробивного напряжения пикселя от дозы легирования фосфора в карман для разной эпитаксии показывает, что приемлемый диапазон пробивных напряжений пикселя (30±5) В обеспечивают дозы в карман в диапазоне от $4{,}5\cdot10^{12}$ до $5{,}5\cdot10^{12}$ ион/см^2 на энергии 300 кэВ – для эпитаксии 4КЭФ0,8 и от $5{,}5\cdot10^{12}$ до $6{,}5\cdot10^{12}$ ион/см^2 на энергии 300 кэВ – для эпитаксии 6КЭФ1,5.



а *б*

Рис. 3. Профиль легирования примесей в пикселе с разными дозами в N-карман на эпитаксии: *а* – 4КЭФ0,8; *б* – 6КЭФ1,5

Для выбранных режимов легирования проведено моделирование для проверки изоляции между пикселями с учетом того, что все пиксели находятся под одним и тем же напряжением питания. Оценивалось отсутствие смыкания обедненных областей между пикселями, т.е. утечек между ними. На рисунке 4 представлена ОПЗ (серый цвет), распространяемая под Locos изоляцию с легированным фосфором кольцом стоп слоя с дозой легирования $D = 3 \cdot 10^{13}$ ион/см^2 и $E = 60$ кэВ в эпитаксиальной пленке 4КЭФ0,8, а также указаны доза легирования кармана фосфором и рассчитанное в приборном моделировании пробивное напряжение *p–n*-перехода. Ширина ОПЗ в области стоп канала в глубину кремния составляет: 14,2 нм, 12,4 нм, 11,20 нм для доз легирования кармана фосфором $4{,}5 \cdot 10^{12}$ ион/см^2, $5{,}0 \cdot 10^{12}$ ион/см^2 и $5{,}5 \cdot 10^{12}$ ион/см^2, соответственно. Аналогичные результаты получены и для эпитаксии 6КЭФ1,5.

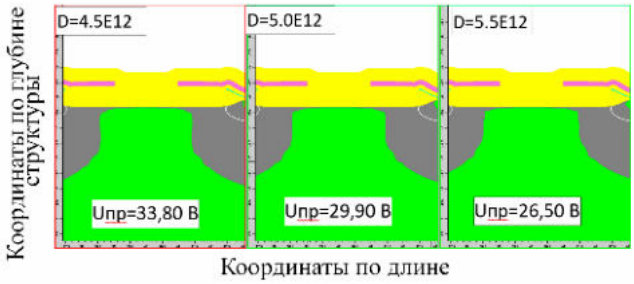


Рис. 4. Моделирование пробивного напряжения между пикселями на пластине 4КЭФ0,8 и распространения ОПЗ (серый цвет) для разных доз легирования кармана фосфором

По результатам приборного моделирования по ширине ОПЗ в области стоп канала и месту локализации пробоя, идущего по дну *p–n*-перехода, можно сделать вывод, что для обеспечения требуемой изоляции между пикселями МП ЛФД доза фосфора в область стоп канала для эпитаксии 4КЭФ0,8 составляет $D = 3 \cdot 10^{13}$ ион/см^2 с $E = 60$ кэВ, и для эпитаксии 6КЭФ1,5 Д=$3 \cdot 10^{13}$ ион/см^2 с $E = 60$ кэВ, соответственно.

Ёмкость пикселя влияет на время зарядки/разрядки пикселя ФЭУ согласно выражения: $\tau \sim C_{ФЭУ} R_L$. Чем меньше ёмкость, тем быстрее пиксель перезаряжается (сброс лавины) и, следовательно, быстрее готова к следующему улавливанию фотона. Анализ зависимостей емкости от дозы легирования кармана и используемой

эпитаксиальной пленки показаны на рисунке 5. Емкость пикселя ФЭУ площадью 35×35 мкм для эпитаксии 4КЭФ0,8 составляет от 74 до 84 фФ при $U_{см} = -25$ В, а для эпитаксии 6КЭФ1,5 от 62 до 69 фФ при $U_{см} = -25$ В. Следует заметить, что пиксели, сформированные на эпитаксии 6КЭФ1,5, имеют меньшую ёмкость, следовательно, меньшее время разрядки матрицы ячеек. По результатам приборного моделирования ВФХ рекомендуется для изготовления экспериментальной партии использовать следующие эпитаксиальные пленки различной концентрации примеси: $N = 6{,}31 \cdot 10^{15}$ см$^{-3}$для КЭФ0,8 и $N = 3{,}21 \cdot 10^{15}$ см$^{-3}$для КЭФ1,5.

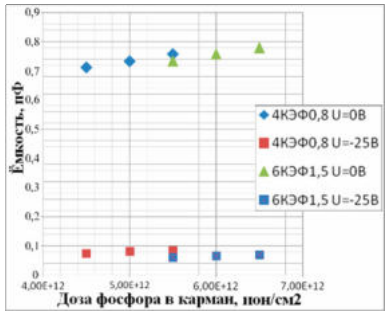


Рис. 5. Зависимость ёмкости пикселя от дозы легирования фосфора в карман для разных эпитаксий

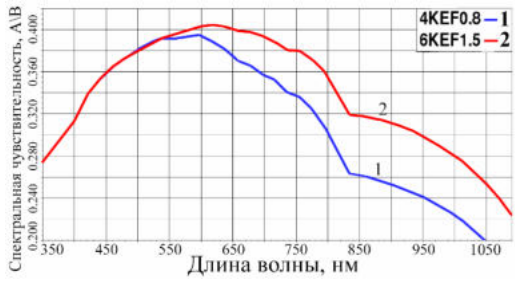


Рис. 6. Спектральная чувствительность пикселя ФЭУ для разных эпитаксий в диапазоне длин волн λ от 350 до 1100 нм, $U_{см} = 0$ В

Немаловажную роль в получении хорошей чувствительности фотодетектора играет состояние поверхности, принимающей детектируемое излучение. Коэффициент отражения от чистой поверхности кремния R составляет от 30 до 40 %. Поэтому для увеличения количества проникающих в полупроводник фотонов на поверхность полупроводника наносят просветляющее покрытие. Для минимизации коэффициента отражения на поверхности кремния используют просветляющие покрытия из комбинации SiO_2 ($d = 20$ нм) и Si_3N_4 ($d = 30$ нм). По технологическому моделированию получились следующие толщины просветляющего покрытия SiO_2 ($d = 21$ нм) и Si_3N_4 ($d = 30$ нм). Было проведено моделирование коэффициента отражения просветляющего покрытия в диапазоне длин волн λ от 350 до 1100 нм. Минимальный коэффициент отражения получен на длине волны $\lambda = 438$ нм и составляет $R = 2{,}58$ %. Важнейшим параметром МП ЛФД также является спектральная чувствительность. На рисунке 6 представлены результаты моделирования спектральной чувствительности для разных вариантов эпитаксий. Максимум спектральной чувствительности для эпитаксии 4КЭФ0,8 (на длине волны $\lambda = 596$ нм) составляет порядка 0,395 А/Вт, а для 6КЭФ1,5 (на длине волны $\lambda = 616$ нм) порядка 0,405 А/Вт. Значения спектральной чувствительности незначительно выше для эпитаксии 6КЭФ1,5 со смещением пика максимума. Также стоит отметить, для эпитаксии 6КЭФ1,5 расширяется диапазон детектирования в области ИК излучения по сравнению с 4КЭФ0,8.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

По результатам технологического моделирования пикселя МП ЛФД на разных эпитаксиальных плёнках 4КЭФ0,8 и 6КЭФ1,5 были получены: вертикальная структура пикселя МП ЛФД и профили легирования. По результатам приборного моделирования получены значения пробивных напряжений (30 ± 5) В, в зависимости от дозы легирования кармана под анод; получено, что емкость пикселя на эпитаксии 6КЭФ1,5 меньше чем на эпитаксии 4КЭФ0,8 и, следовательно, имеет меньшее время разрядки матрицы ячеек; определен минимальный коэффициент отражения на длине волны $\lambda = 438$ нм ($R = 0{,}0258 = 2{,}58\,\%$) для просветляющего покрытия $SiO_2 + Si_3N_4$; определен максимум спектральной чувствительности для эпитаксии 4КЭФ0,8 на длине волны $\lambda = 596$ нм порядка 0,395 А/Вт, а для 6КЭФ1,5 на длине волны $\lambda = 616$ нм порядка 0,405 А/Вт. Определено, что для эпитаксии 6КЭФ1,5 расширяется диапазон детектирования в области ИК излучения по сравнению с 4КЭФ0,8. Полученные результаты могут быть использованы при разработке технологического маршрута изготовления экспериментальной партии образцов МП ЛФД.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЕ ССЫЛКИ

1. Design and properties of silicon avalanche photodiodes/ I. Wêgrzecka, [et al.]//Opto-Electronics Review.-2004. -vol. 12.-№ 1.-P.95-104.
2. Characterization of a large area silicon photomultiplier/ Nagai, C. [et al.] // Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment. – 2019. – P.162796.

КОМПОЗИЦИОННЫЙ СОСТАВ СТРУКТУРЫ ВОЛЬФРАМОВАЯ ПЛЕНКА/КРЕМНИЙ, СФОРМИРОВАННОЙ КАТОДНО-ВАКУУМНЫМ РАСПЫЛЕНИЕМ

О. М. Михалкович[1], С. М. Барайшук[2], Т. М. Ткаченко[2]

[1)] Белорусский государственный педагогический университет имени Максима Танка, ул. Советская, 18, 220050 Минск, Беларусь, e-mail: phyzbober@tut.by
[2)] Белорусский государственный аграрный технический университет, пр. Независимости, 99, 220023 Минск, Беларусь, e-mail: bear_s@yandex.ru

Проведены исследования композиционного состава тонких пленок сформированных, методом катодного распыления W в условиях ионного ассистирования на Si. Ускоряющий потенциал ассистирующих ионов W составлял 7, 15 и 20 кВ, время экспонирования – 1 час. Использовался метод Резерфордовского обратного рассеяния ионов He^+ с энергией 1,45 МэВ ($\Delta E = 15$ кэВ) и геометрией рассеяния $\theta_1 = 0^o$, $\theta_2 = 70^o$, $\theta_3 = 110^o$, и компьютерное моделирование экспериментальных спектров РОР по программе RUMP. Распределение элементов в массиве пленки практически равномерное. Концентрация атомов W, Si, C, O, H в пленке составляет в среднем 12, 6, 48, 29, 5 ат.% соответственно.

Ключевые слова: тонкие пленки; композиционный состав; катодное распыление; ионное ассистирование.