

УДК 621.383.5

**ВЛИЯНИЕ ПЛЕНКИ ПОРИСТОГО КРЕМНИЯ НА СПЕКТРАЛЬНУЮ
ХАРАКТЕРИСТИКУ КРЕМНИЕВОГО ФОТОДИОДА**

В.И. Соколов, Хуинь Конг Ту

Рассмотрено влияние пленки пористого кремния, сформированной методом анодного электрохимического травления р-области, на спектральную характеристику кремниевого фотодиода. Показано, что созданный слой пористого кремния приводит к существенному увеличению спектральной чувствительности во всей области спектра. Наблюдается изменение спектральной чувствительности фотодиода во времени.

Ключевые слова: пористый кремний, спектральная характеристика, фотодиод.

Введение

Важными характеристиками фотодиодов (ФД) является спектральная характеристика и величина фоточувствительности. Известно, что спектральная характеристика фоточувствительности ФД зависит как от объемных параметров полупроводника, так и от конструкции поверхности. Существующие технологии полупроводникового приборостроения позволяют реализовать конструкции фотоприемников, параметры которых, в большинстве случаев, далеки от теоретически достижимых пределов. Это обусловлено использованием высокотемпературных технологических процессов, которые способствуют увеличению дефектности полупроводниковых кристаллов и уменьшению времени жизни носителей заряда [1, 2]. Дальнейшее улучшение параметров и характеристик ФД может быть связано, например, с использованием флип-чип конструкций [3] или конструкций ФД с точечным контактом на обращенной к источнику поверхности [4].

В работе рассматриваются результаты исследований влияния на спектральную характеристику кремниевого ФД пленки пористого кремния (ПК), сформированной методом анодного электрохимического травления р-области ФД [5, 7].

Методика эксперимента

В качестве объектов исследования использовались планарные структуры кремниевых ФД типа ФП-1, изготовленные по стандартной планарной технологии методом локальной диффузии из газовой фазы. Исходной подложкой для изготовления ФД являлась пластина монокристаллического кремния п-типа с удельным сопротивлением 20 Ом·м, легированная фосфором и ориентированная в кристаллографической плоскости (100). Ниже приведена сокращенная схема технологического процесса изготовления планарной структуры ФД:

- термическое окисление кремниевой подложки (формирование маскирующего слоя SiO_2);
- травление слоя SiO_2 с обратной стороны подложки;
- диффузия фосфора из газовой фазы, источник – POCl_3 ; концентрация фосфора в подложке составляет порядка 10^{20} ;
- травление фосфоросиликатного стекла и окисла;
- термическое окисление кремниевой подложки (формирование маскирующего слоя SiO_2);
- фотолитография в слое SiO_2 (вскрытие «окон» для локальной диффузии бора), размер «окон» – $5 \times 5 \text{ мм}^2$;
- локальная диффузия бора из постоянного источника BBr_3 (первая стадия диффузии);
- вторая стадия диффузии (разгонка фосфора в атмосфере сухого кислорода), глубина диффузии – 1,2 мкм;
- фотолитография в слое SiO_2 (вскрытие окон для омических контактов к анодам ФД);
- термовакуумное напыление пленки алюминия для получения омических контактов;
- фотолитография в пленке алюминия и термический отжиг (формирование омических контактов к анодам фотодиодов).

Схема структуры ФД, изготовленной по приведенной выше технологии, представлена на рис. 1. Для получения пленки ПК на фоточувствительной поверхности ФД использовался процесс анодирования в растворе HF (30%). Слои ПК формировались в однокамерной ячейке с платиновыми электродами при комнатной температуре. Плотность тока была фиксирована и равнялась 20 мА/см^2 , а продолжительность процедуры анодирования варьировалась и составляла $t = 1, 2, 3, 4, 5$ мин. При временах анодирования 2–3 мин стабильно получались тонкие слои ПК. Такие слои обеспечивали получение повторяемых спек-

тральных характеристик ФД. При увеличении времени травления до 4–5 мин часто возникали трудности при снятии спектральных характеристик, что, по-видимому, было связано с локальными протравлениями р-областей анодов, приводящими к частичному закорачиванию р-n-переходов. В связи с этим все экспериментальные образцы, на которых проводились исследования спектральных характеристик, анодировались в течение 3 мин. Все образцы анодировались при естественном освещении подложек. После электрохимической обработки образцы промывались в деионизованной воде и просушивались на воздухе в термостате при температуре 80–90°С. Площадь пленки ПК занимает около 50% площади анода ФД.

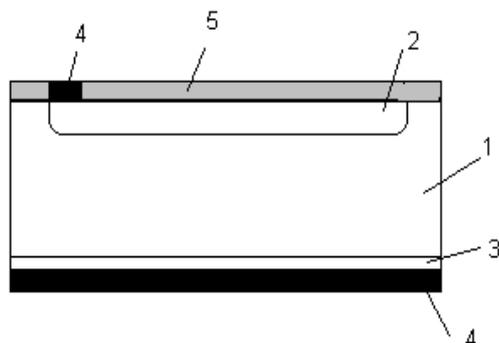


Рис. 1. Схема кремниевого планарного ФД: 1 – кремниевый кристалл n-типа; 2 – диффузионная р-область; 3 – контактная n+ – область, легированная фосфором; 4 – омический контакт; 5 – просветляющее покрытие SiO₂

С помощью спектрофотометра СФ–26 на полученных экспериментальных образцах проводились измерения спектральной зависимости структур при комнатной температуре в диапазоне длин волн 400–1200 нм с шагом 20 нм. В результате измерений спектральных характеристик образцов, полученных при разных временах травления, оптимальным временем травления, как уже было сказано выше, было установлено 3 мин.

Результаты и их обсуждение

Результаты проведенных исследований изменения спектральной чувствительности экспериментальных образцов до и после травления слоя SiO₂ и электрохимической обработки представлены на рис. 2. Как видно из приведенного рисунка, для ФД с ПК покрытием спектральная чувствительность существенно увеличивается.

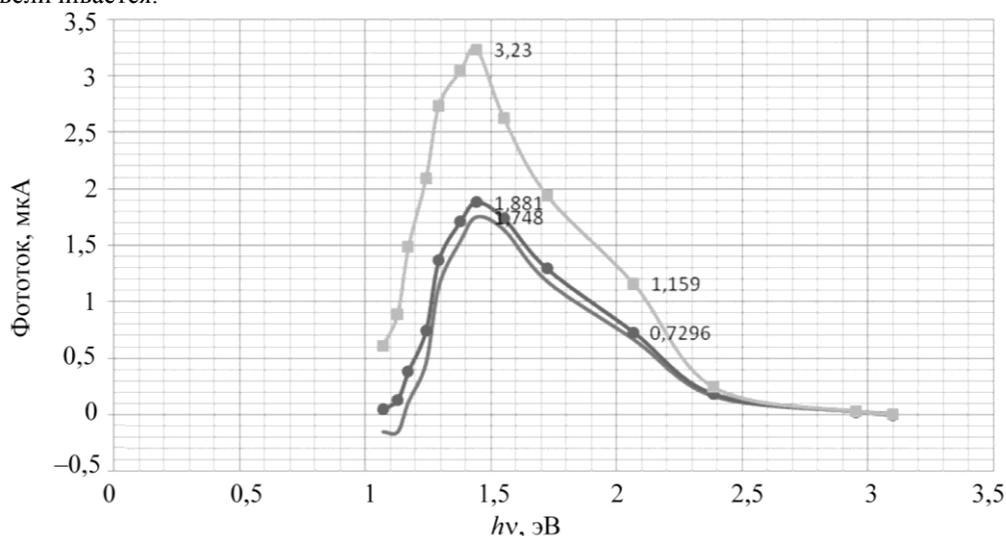


Рис. 2. Спектральная характеристика фотодиода, с которого снят слой защитного окисла и поверхность его р-области обработана электрохимическим травлением: —●— без слоя SiO₂; —■— со слоем SiO₂; —■— с ПК покрытием

Чувствительность ФД зависит как от физических ограничений, связанных с выбором материала для его получения, так и от конструкции фотоприемника. Для ее увеличения необходимо уменьшать отражение падающего оптического излучения от поверхности ФД и увеличивать коэффициент собирания носителей заряда.

Известно, что малые размеры нанокристаллов ПК и большая общая площадь их поверхности обуславливают большую чувствительность ПК к внешней среде. Поверхность свежеприготовленного ПК

покрыта группами Si-H_x, причем количество атомов водорода в таких группах может быть больше, чем в группах на поверхности монокристаллического кремния [8]. Такое покрытие в малых нанокристаллах (меньше 3 нм), согласно [9], увеличивает энергию излучаемых квантов света из-за ликвидации связей Si-O, которые захватывают электроны экситонов, уменьшая этим энергию излучаемых квантов.

Более того, ПК рассматривается как двухфазная система, содержащая квантово-размерные нанокристаллы (nc-Si) в матрице пористого SiO_x. При этом граница ПК с p-Si содержит участки nc-Si/p-Si и SiO_x/p-Si. При поглощении света в ПК имеет место также захват неравновесных дырок на ловушки внутренней поверхности nc-Si/SiO_x во время действия последовательного излучения.

Если энергия кванта падающего излучения больше ширины запрещенной зоны p-Si, но меньше ширины запрещенной зоны ПК, то излучение поглощается в p-Si. С увеличением энергии квантов падающего излучения до значений, соответствующих энергии ширины запрещенной зоны ПК, происходит фотогенерация дырок в ПК.

Кроме того, немаловажным механизмом, определяющим высокую спектральную чувствительность исследуемых фотодиодов, является низкая скорость поверхностной рекомбинации на границе раздела пористый кремний – монокристаллический кремний. При исследовании фотоиндуцированного захвата заряда в ПК в [10] была обнаружена компонента фотоЭДС, связанная с областью обеднения в p-Si на границе с ПК, и установлено присутствие медленных состояний на поверхности пор.

Следует отметить, что в случае хранения экспериментальных образцов на воздухе был обнаружен спад спектральной чувствительности. Она постепенно уменьшается с увеличением времени хранения. Данные, иллюстрирующие изменение спектральной чувствительности экспериментальных образцов, приведены на рис. 3. Эффект уменьшения спектральной чувствительности можно объяснить тем, что поверхность свежеприготовленного ПК покрыта группами Si-H_x. В процессе хранения ПК происходит окисление кремния, и группы Si-H_x замещаются группами Si-O_x, т.е. имеет место дегидрирование поверхности. Эти группы захватывают электроны экситонов, уменьшая этим энергию излучаемых квантов. В дополнение к этому, поверхность ПК очень чувствительна к внешней среде. На ней адсорбированы также OH-группы, углеродные соединения и следы фтора, хлора и азота [11].

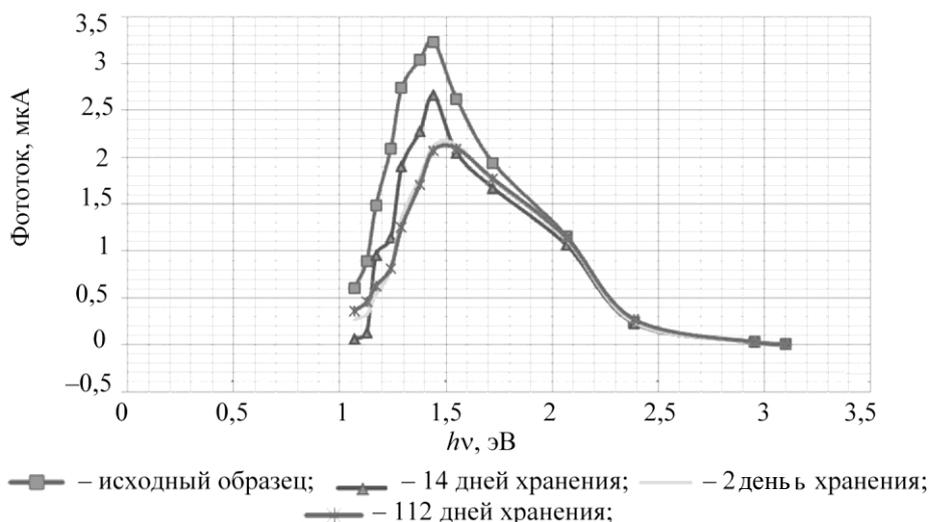


Рис. 3. Изменение спектральной характеристики фотодиода с пленкой ПК на поверхности анода в процессе хранения в комнатных условиях

Заключение

Из сказанного можно делать вывод, что формирование пленки пористого кремния на чувствительной поверхности фотодиода приводит к увеличению его спектральной чувствительности. Эти результаты могут быть использованы при разработке перспективных кремниевых солнечных элементов и оптических фильтров.

Литература

1. Торопкин Г.Н. Основы надежности изделий квантовой электроники. – М.: Радио и связь, 1983. – 240 с.
2. Парфенов О.Д. Технология микросхем. – М.: Высшая школа, 1986. – 320 с.
3. Holland S.E., Wang N.W., Moses W.W. Development of low noise, back-side illuminated silicon photodiode arrays // IEEE Transactions on Nuclear Science. – 1997. – V. 44. – № 3. – P. 443–447.

4. Андреев И.А., Ильинская Н.Д., Куницына Е.В., Михайлова М.П., Яковлев М.П. Высокоэффективные фотодиоды на основе GaInAsSb / GaAlAsSb для спектрального диапазона 0,9–2,55 мкм с большим диаметром чувствительной площадки // ФТП. – 2003. – Т. 37. – Вып. 8. – С. 974–979.
5. Rouquerol J., Avnir D., Fairbridge C.W., Everett D.H., Haynes J.H., Pernicone N., Ramsay J.D.F., Sing K.S.W., Unger K.K. Recommendations for the characterization of porous solids // Pure Appl. Chem. – 1994. – V. 66. – № 8. – P. 1739–1758.
6. Canham L.T. Silicon quantum wire array fabrication by electrochemical and chemical dissolution of wafers // J. Appl. Phys. Lett. – 1990. – V. 57. – № 10. – P. 1046–1048.
7. Федулова Г.В., Нечитайлов А.А. Щелочное вскрытие макропор при изготовлении кремниевых структур со сквозными каналами // Научно-технический вестник СПбГУ ИТМО. – 2007. – Т. 40. – С. 75–79.
8. Canham L.T. Properties of porous silicon. – London: INSPEC, 1997. – 364 p.
9. Wolkin M.V., Jorne J., Fauchet P.M., Allan G., Delerue C. Electronic States and Luminescence in Porous Silicon Quantum Dots: The Role of Oxygen // Phys. Rev. Lett. – 1999. – V. 82. – № 1. – P. 197–200.
10. Матвеева А.Б., Константинова Е.А., Тимошенко В.Ю., Кашкаров П.К. Исследование фотоЭДС и фотоиндуцированного захвата заряда в пористом кремнии // ФТП. – 1995. – Т. 29. – Вып. 12. – С. 2180–2188.
11. Балагуров Л.А., Павлов В.Ф., Петрова Е.А., Боронина Г.П. Исследование пористого кремния и его старения методами полного внешнего отражения рентгеновских лучей и инфракрасной спектроскопии // ФТП. – 1997. – Т. 31. – Вып. 8. – С. 957–960.

Соколов Владимир Иванович

– Физико-технический институт им. А.Ф. Иоффе РАН, доктор физ.-мат. наук, профессор

Хуинь Конг Ту

– Санкт-Петербургский государственный университет информационных технологий, механики и оптики, аспирант, Picochip912@yahoo.com