

ОБ УЛУЧШЕНИИ ЧУВСТВИТЕЛЬНОСТИ КРЕМНИЕВЫХ ФОТОСЕНСОРОВ*В.П. КОСТЫЛЕВ, Т.В. СЛУСАР, А.В. СУШИЙ, В.В. ЧЕРНЕНКО*

В работе исследованы возможности улучшения характеристик кремниевых фотосенсоров классической конструкции. Экспериментально установлено, что тонкий поверхностный слой сильнолегированного эмиттера в таких сенсорах имеет нарушенную структуру с высоким уровнем рекомбинационных потерь. В результате этого фотосенсоры имеют большие величины обратных темновых токов, низкую коротковолновую чувствительность, недостаточно высокие значения фотоэлектрических параметров. Показано, что удаление нарушенного слоя посредством применения циклов травливания-выращивания слоя окисла на поверхности эмиттера в процессе изготовления фотосенсоров является эффективным методом уменьшения рекомбинационных потерь и позволяет существенно повысить их коротковолновую и пороговую чувствительность.

Ключевые слова: фотосенсор, фоточувствительность, рекомбинационные потери, спектральная характеристика, обратный темновой ток.

ВВЕДЕНИЕ

Повышение фоточувствительности и улучшение пороговой чувствительности кремниевых фотосенсоров (ФС) остается актуальной задачей уже в течение довольно длительного времени. Одним из основных путей достижения этого является уменьшение рекомбинационных потерь в таких приборах, для чего необходимо минимизировать скорости объемной рекомбинации в их эмиттерной и базовой областях, а также поверхностной рекомбинации на фотоприемной и тыльной поверхностях. Так, для ФС классической конструкции (в которых сильнолегированная эмиттерная область сформирована возле фотоприемной поверхности прибора, а базовая область с умеренным уровнем легирования и противоположным типом проводимости расположена между эмиттерной областью и тыльным контактом) уменьшение рекомбинационных потерь на фотоприемной поверхности и в эмиттерной области приводит к повышению коротковолновой фоточувствительности и к расширению спектрального диапазона фоточувствительности в область более коротких длин волн, а уменьшение рекомбинационных потерь в базовой области и на тыльной поверхности – к повышению длинноволновой фоточувствительности. Известно, что для уменьшения скорости объемной рекомбинации необходимо обеспечить высокие значения времени жизни неравновесных носителей заряда в готовом ФС (что обычно достигается использованием кремниевого материала с высоким значением времени жизни и применением таких операций технологического процесса изготовления, которые позволяют сохранить достаточно высокие значения этого параметра в активных областях изготовленного сенсора), а для уменьшения негативного влияния поверхностной рекомбинации на характеристики ФС широко применяется пассивация поверхности кремния. Уменьшение рекомбинационных потерь также уменьшает величину обратного темнового тока, что приводит к улучшению пороговой чувствительности ФС [1-6].

При изготовлении кремниевых ФС описанной выше классической конструкции с базой *p*-типа было замечено, что начальные этапы окисления поверхности созданного путем диффузии фосфора сильнолегированного эмиттерного n^+ -слоя таких приборов протекают значительно быстрее по сравнению с типичными скоростями окисления поверхности монокристаллического кремния. Проведенные дополнительные исследования с последующим анализом показали, что тонкая приповерхностная область эмиттерного слоя имеет рыхлую пористообразную структуру, а изготовленные ФС имеют невысокую пороговую чувствительность и недостаточно высокие значения фотоэлектрических параметров, в частности, тока короткого замыкания и напряжения холостого хода, обусловленные, как показали проведенные исследования темновых вольт-амперных характеристик (ВАХ) и спектральных характеристик изготовленных ФС, относительно высокими значениями их темновых обратных токов и невысокой спектральной чувствительностью в коротковолновой области спектра вследствие повышенных рекомбинационных потерь в эмиттерном слое.

Целью данной работы было исследование возможностей улучшения характеристик таких ФС за счет уменьшения рекомбинационных потерь в их эмиттерной n^+ -области.

1. МЕТОДИКА ЭКСПЕРИМЕНТОВ

Экспериментальные исследования были проведены на образцах ФС классической конструкции толщиной около 380 мкм и площадью 5×5 мм² с базой *p*-типа, изготовленных на основе кремния марки КДБ-9 с удельным сопротивлением $\rho \approx 9$ Ом·см и со сформированной путем диффузии фосфора n^+ -эмиттерной областью. Для пассивации и уменьшения оптических потерь на освещаемую фронтальную поверхность ФС было нанесено двухслойное покрытие $\text{SiO}_2 + \text{Si}_3\text{N}_4$. На тыльной поверхности ФС был сформирован сплошной алюминиевый контакт,

а на фронтальной – алюминиевый контакт в виде сетки, которая представляла собой совокупность узких «пальцев», замкнутых на более широкую центральную шину.

Для исследования возможностей улучшения характеристик таких ФС за счет уменьшения рекомбинационных потерь в их n^+ -области фронтальная фотоприемная поверхность эмиттерного слоя при изготовлении в одном технологическом процессе различных групп ФС подвергалась разному количеству циклов травливания-выращивания слоя окисла (от 1 до 3) с целью перевести тонкий нарушенный приповерхностный слой кремния в слой двуокиси кремния и затем последующим травлением удалить его. Выращивание слоя окисла проводилось в хлорной среде (в парах HCl) при температуре 1050°C в течении 40 мин, а его травливание – в плавиковой кислоте, после чего образцы тщательно промывались в деионизированной воде. При этом значительное снижение с последующей стабилизацией значения скорости протекания процесса окисления поверхности эмиттера указывает на окончательное удаление приповерхностного нарушенного слоя. После завершения процесса изготовления для экспериментальных образцов ФС различных групп проводились следующие исследования:

– световых ВАХ (энергетическая освещенность $P_L = 1360$ Вт/м², температура $T = 25^\circ\text{C}$) и полученных из них основных фотоэлектрических параметров;

– спектральных зависимостей тока короткого замыкания в диапазоне длин волн 400 ÷ 1200 нм, измеренных в режиме автоматического поддержания постоянного уровня энергетической освещенности;

– темновых ВАХ и определенных из них величин обратных токов при разных величинах приложенного напряжения.

Полученные результаты сравнивались с аналогичными характеристиками и параметрами, полученными для образцов ФС базовой группы, которая была изготовлена в том же технологическом процессе, но без применения указанных циклов травливания-выращивания слоя окисла на их фотоприемной поверхности. При этом каждая группа изготовленных ФС состояла из 8-10 образцов.

Исследование световых ВАХ позволяет изучить, в частности, поведение тока короткого замыкания ФС, величина которого определяется эффективностью собирания фотогенерированных носителей заряда, а при помощи анализа спектральных зависимостей тока короткого замыкания можно установить особенности протекания рекомбинационных процессов, которые, в свою очередь, влияют на эффективность собирания неравновесных носителей заряда в ФС. Определение величин темновых обратных токов при разных величинах приложенного

напряжения также позволяет провести сравнение уровней рекомбинационных потерь в изготовленных ФС различных групп. Кроме того, чем ниже значения темновых токов, тем выше пороговая чувствительность ФС, которая для приборов такого класса является очень важной характеристикой. Следует добавить, что измерения световых ВАХ и спектральных зависимостей проводились на установке фототехнических испытаний солнечных элементов и на установке для определения относительных спектральных характеристик фотопреобразователей в аттестованном органами Госпотребстандарта Украины Центре испытаний фотопреобразователей и батарей фотоэлектрических Института физики полупроводников им. В.Е. Лашкарева НАН Украины [7, 8].

2. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Измерение световых ВАХ проводились на экспериментальных образцах ФС всех групп, начиная с базовой группы (группа № 0), образцы которой не подвергались удалению окисла, сформированного на эмиттерном n^+ -слое в процессе изготовления ФС, и на образцах групп №№ 1, 2, 3, прошедших определенное количество циклов травливания-выращивания слоя SiO₂ на их фронтальной поверхности (номер группы соответствует количеству указанных циклов). Значения фотоэлектрических параметров экспериментальных образцов ФС различных групп, определенных из этих световых ВАХ, приведены в табл. 1.

Таблица 1

Влияние разного количества циклов травливания-выращивания слоя SiO₂ на фотоэлектрические параметры экспериментальных образцов ФС различных групп

№ группы	Количество циклов	$I_{кз}$, мА	$V_{хх}$, мВ
0	0	5,7÷5,8	590÷595
1	1	6,3÷6,4	605÷615
2	2	5,1÷5,9	575÷600
3	3	5,7÷6,4	595÷610

Как видно из данных табл. 1, после проведения одного цикла травливания-выращивания слоя окисла на фронтальной поверхности ФС значения тока короткого замыкания $I_{кз}$ на образцах группы 1 по сравнению с образцами базовой группы 0 выросли примерно на 10% (с 5,7 ÷ 5,8 мА до 6,3 ÷ 6,4 мА), а значение напряжения холостого хода $V_{хх}$ – примерно на 3% (с 590 ÷ 595 мВ до 605 ÷ 615 мВ). Проведение 2 и 3 циклов травливания-выращивания слоя окисла не приводит к дальнейшему росту значений фотоэлектрических параметров по сравнению с образцами группы 1, а наоборот, наблюдается некоторое ухудшение фотоэлектрических параметров, что может быть связано с образованием объемных рекомбинационных центров при больших суммарных

временах проведения высокотемпературных обработок в процессе окисления [5, 9-10].

Как показали проведенные исследования спектральных зависимостей тока короткого замыкания $I_{кз}$, величина спектральной фоточувствительности в диапазоне длин волн 400-800 нм для экспериментальных образцов ФС группы 1, которые изготавливались с применением одного цикла стравливания-выращивания слоя окисла на их фронтальной поверхности, значительно повысилась по сравнению с величиной спектральной фоточувствительности, полученной для экспериментальных образцов ФС базовой группы 0, которые были изготовлены без проведения такого цикла стравливания-выращивания, рис. 1.

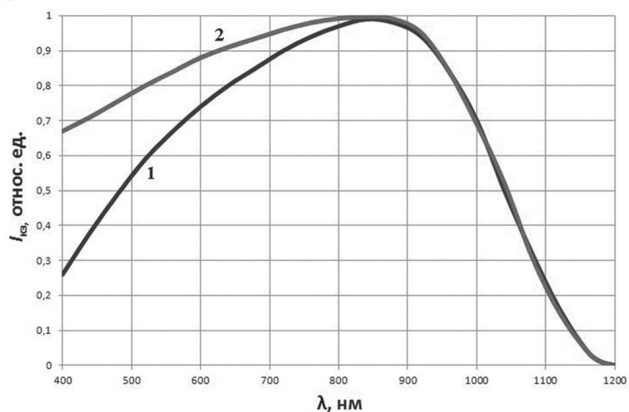


Рис. 1. Типичные нормированные на постоянное число квантов и на 1 в максимуме спектральные зависимости тока короткого замыкания $I_{кз}$, полученные для экспериментальных образцов ФС группы 0 (кривая 1) и группы 1 (кривая 2)

В частности, на длине волны 400 нм величина $I_{кз}$ увеличилась примерно в 2,5 раза. Такое повышение фоточувствительности обусловлено понижением уровня рекомбинационных потерь за счет удаления приповерхностного нарушенного слоя эмиттера путем стравливания-выращивания слоя окисла. Применение большего количества таких циклов стравливания-выращивания слоя окисла (2 или 3) не приводит к дальнейшему повышению фоточувствительности экспериментальных образцов ФС групп 2 и 3 по сравнению с образцами группы 1, что также может быть связано с образованием объемных рекомбинационных центров при больших суммарных временах проведения высокотемпературных обработок. Но образцы групп 2 и 3 все же имели значительно более высокую фоточувствительность в диапазоне длин волн 400-800 нм, чем образцы группы 0. При этом величина фоточувствительности на длине волны 400 нм для образцов групп 2 и 3 была в 1,5-2 раза больше, чем для образцов базовой группы (данные экспериментальных образцов ФС групп 2 и 3 на рис. 1 не приведены).

Как уже отмечалось, определение величин темновых обратных токов при разных величинах приложенного напряжения позволяет провести

сравнительные исследования уровней рекомбинационных потерь в изготовленных ФС различных групп. Измеренные на исследуемых образцах ФС значения темновых обратных токов при разных величинах приложенных напряжений (0,01, 1 и 5 В) приведены на рис. 2.

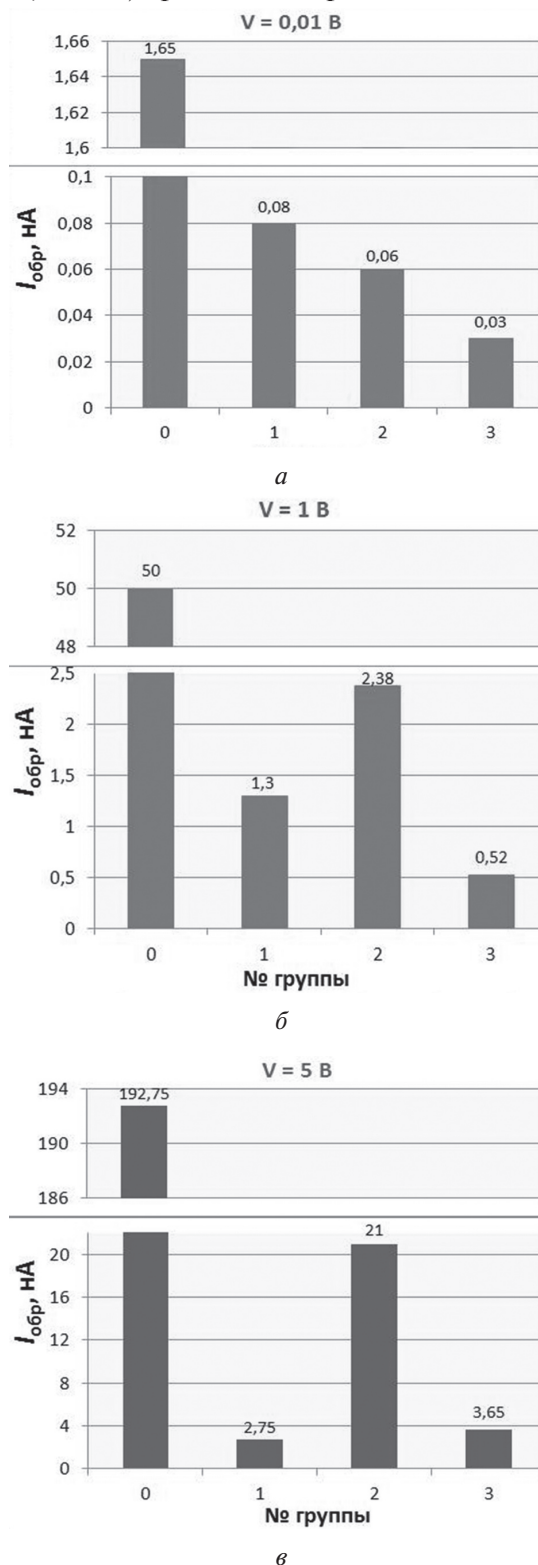


Рис. 2. Влияние количества проведенных циклов стравливания-выращивания слоя SiO_2 на усредненную величину обратных темновых токов $I_{обр}$ экспериментальных образцов ФС разных групп в зависимости от величины приложенного напряжения, V : а – $V=0,01$ В; б – $V=1$ В; в – $V=5$ В

Из анализа данных рис. 2 видно, что средние значения обратных темновых токов для экспериментальных образцов ФС группы 1 уменьшаются не менее чем на порядок по сравнению со значениями, полученными для экспериментальных образцов ФС базовой группы 0. Проведение большего количества циклов травливания-выращивания окисного слоя на поверхности эмиттера не при всех значениях приложенных напряжений приводит к монотонному уменьшению величин обратных темновых токов, но, следует отметить, что при проведении 3 циклов травливания-выращивания величины обратных темновых токов экспериментальных образцов ФС уменьшаются уже примерно на 2 порядка по сравнению со значениями, полученными для образцов базовой группы. Подводя итоги, отметим, что применение от 1 до 3 циклов травливания-выращивания слоя окисла на поверхности эмиттера значительно уменьшает уровень рекомбинационных потерь в исследованных образцах ФС и существенно улучшает пороговую чувствительность кремниевых ФС.

ВЫВОДЫ

В результате проведенных исследований установлено, что на поверхности созданного путем диффузии сильнолегированного эмиттерного слоя существует тонкая нарушенная приповерхностная область с рыхлой пористообразной структурой, приводящая к значительным рекомбинационным потерям, которые существенно уменьшают как фоточувствительность ФС в коротковолновой области спектра (область длин волн 400–800 нм), так и величины его тока короткого замыкания и напряжения холостого хода. Высокий уровень рекомбинационных потерь подтверждается большими величинами темновых обратных токов и обуславливает невысокую пороговую чувствительность ФС. Экспериментально показано, что применение циклов травливания-выращивания слоя окисла на поверхности эмиттера при изготовлении ФС является эффективным методом уменьшения рекомбинационных потерь, что происходит за счет удаления пористообразного нарушенного слоя и позволяет существенно повысить фоточувствительность ФС, а также увеличить эффективность их действия. Кроме того, в результате применения операций травливания-выращивания слоя окисла значительно улучшаются пороговые характеристики ФС: их пороговая чувствительность возрастает не менее чем на порядок величины при применении одного цикла травливания-выращивания слоя окисла на поверхности эмиттера и примерно на два порядка величины при использовании трех таких циклов травливания-выращивания.

Литература

[1] Про порогову фоточутливість кремнієвих МДН фотосенсорів з нерівноважним виснаженням / Горбань А.П., Саченко А.В., Костильов В.П. та ін. // Сенсорна електроніка і мікросистемні технології. — 2005. — № 1. — С.46-51

- [2] Silicon photodiodes covered with diamond-like carbon films as sensors for UV radiation / Klyui N.I., Kostylyov V.P., Litovchenko V.G. et al. // Міжнародна наук.-техн. конф. „Сенсорна електроніка і мікросистемні технології (СЕМСТ-1)”. Україна, Одеса, 1-5 червня 2004 р.
- [3] Литовченко В.Г., Горбань А.П. Основы физики микроэлектронных систем металл-диэлектрик-полупроводник. — Киев.: Наукова думка, 1978. — 316 с.
- [4] Green M.A. Silicon solar cells: evolution, high-efficiency design and efficiency enhancement // Semicond. Sci. Technol. — 1993. — Vol. 8, № 1. — P.1-12.
- [5] Горбань А.П., Костыльов В.П., Черненко В.В. Генезис генерационных и зарядовых характеристик системы Si-SiO₂ в процессе изготовления КМОП БИС // Оптоэлектроника и полупроводниковая техника. — 1992. — Вып. 24. — С. 61-66.
- [6] Swanson R.M. Approaching the 29% limit efficiency of silicon solar cells. — Proc. 20th European Photovoltaic Solar Energy Conf. — Barcelona, Spain, 2005. — P. 584-589.
- [7] Свідоцтво про атестацію Центру випробувань фотоперетворювачів та батарей фотоелектричних Інституту фізики напівпровідників ім. В.Є. Лашкарьова НАН України, №ПТ-102/10. Видане 1 квітня 2010 року Державним підприємством Всеукраїнський державний науково-виробничий центр стандартизації, метрології, сертифікації та захисту прав споживачів (ДП “Укрметрестандарт”).
- [8] Клюй М.І., Костильов В.П., Макаров А.В., Черненко В.В. Метрологічні аспекти випробувань фотоелектричних перетворювачів сонячної енергії // Складні системи і процеси. — 2007. — № 1. — С. 42-50.
- [9] Effect of heat treatment on the minority carrier lifetime in oxygen-containing silicon / Glinchuk K.D., Litovchenko N.M., Salnik Z.A. et al. // Phys. Status Solidi A. — 1983. — Vol. 79, № 7. — P. 159-163.
- [10] Глинчук К.Д., Литовченко Н.М., Скрыль С.И. Рекомбинационные центры в термообработанном кремнии // Оптоэлектроника и полупроводниковая техника. — 1985. — Вып. 7. — С. 58-66.

Поступила в редколлегию 20.06.2012

Костыльов Віталій Петрович, доктор фізико-математических наук, старший научний співробітник, завідує відділом фізико-технічних основ напівпровідникової фотоенергетики Інституту фізики напівпровідників ім. В.Є. Лашкарьова НАН України (г. Київ). Область наукових інтересів: фізика напівпровідників і напівпровідникових пристроїв, фотоенергетика, сенсорика, метрологія.



Слусар Татяна Владимировна, аспірантка Національного авіаційного університету (г. Київ). Область наукових інтересів: напівпровідникове матеріалознавство, фізика напівпровідників і напівпровідникових пристроїв, сенсорика.





Суший Андрей Владимирович, инженер по качеству 1 кат. отдела контроля качества изготовления фотоэлектрических преобразователей и модулей ПАО «КВАЗАР» (г. Киев). Область научных интересов: физика полупроводниковых приборов, фотоэнергетика, сенсорика.



Черненко Владимир Васильевич, кандидат физико-математических наук, старший научный сотрудник, старший научный сотрудник отдела физико-технических основ полупроводниковой фотоэнергетики Института физики полупроводников им. В.Е. Лашкарёва НАН Украины (г. Киев). Область научных интересов: физика полупроводников и полупроводниковых приборов, фотоэнергетика, сенсорика, метрология.

УДК 621.315.592

Про покращення чутливості кремнієвих фотосенсорів / В.П. Костилюв, Т.В. Слусар, А.В. Суший, В.В. Черненко // Прикладна радіоелектроніка: наук.-техн. журнал. – 2012. Том 11. № 3. – С. 440-444.

У статті досліджено можливості покращення характеристик кремнієвих фотосенсорів класичної конструкції. Показано, що застосування циклів травлення-виращування шару окислу на поверхні емітера під час виготовлення сенсорів є ефективним методом зменшення рекомбінаційних втрат і підвищення порогової чутливості, що дозволяє суттєво підвищити їх короткохвильову фоточутливість та ефективність роботи.

Ключові слова: фотосенсор, фоточутливість, рекомбінаційні втрати, спектральна характеристика, зворотний темновий струм.

Табл. 01. Іл. 02. Бібліогр.: 10 найм.

UDC 621.315.592

Improvements of silicon photosensors sensitivity / V.P. Kostylyov, T.V. Slusar, A.V. Sushiy, V.V. Chernenko // Applied Radio Electronics: Sci. Journ. – 2012. Vol. 11. № 3. – P. 440-444.

The possibilities of improving of classic design silicon photosensor characteristics are investigated in the paper. It is shown that the effective method to reduce recombination losses and increase threshold sensitivity is using cycles of etching-growing of the oxide layer from the emitter surface during the production of photosensors, which allows to substantially increase short-wavelength photo sensitivity and operation efficiency.

Keywords: photosensor, photosensitivity, recombination losses, spectral characteristic, reverse dark current.

Tab. 01. Fig. 02. Ref.: 10 items.