

На правах рукописи



Ласткин Валентин Александрович

**КРЕМНИЕВЫЕ ФОТОПРИЕМНИКИ С ИЗБИРАТЕЛЬНОЙ
ЧУВСТВИТЕЛЬНОСТЬЮ В БЛИЖНЕЙ УЛЬТРАФИОЛЕТОВОЙ ОБЛАСТИ
ОПТИЧЕСКОГО СПЕКТРА**

Специальность: 05.27.01 – Твердотельная электроника, радиоэлектронные компоненты,
микро- и нано- электроника, приборы на квантовых эффектах

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени

кандидата технических наук

Санкт-Петербург – 2013

Работа выполнена в Федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего профессионального образования «Новгородский государственный университет имени Ярослава Мудрого», кафедра общей и экспериментальной физики.

Научный руководитель: Доктор технических наук, профессор,
Гаврушко Валерий Владимирович
Зав. кафедрой общей и экспериментальной физики

Официальные оппоненты: Доктор физико-математических наук, профессор,
Александров Олег Викторович
Начальник лаборатории
ЗАО «Светлана – Полупроводники»

Кандидат технических наук, доцент,
Афанасьев Алексей Валентинович
замест. Директора НОЦ «Нанотехнологии»
«ЛЭТИ» им. В.И. Ульянова (Ленина)

Ведущая организация – ОАО «Московский завод «Сапфир», г. Москва

Защита состоится "05" декабря 2013 года в 16 ч. 00 мин. на заседании диссертационного совета Д 212.238.04 при Санкт-Петербургском государственном электротехническом университете «ЛЭТИ» им. В.И. Ульянова (Ленина) по адресу: 197376, Санкт-Петербург, ул. Проф. Попова, 5.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ФГБОУ ВПО «Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет «ЛЭТИ» им. В.И. Ульянова (Ленина)».

Автореферат разослан «01» ноября 2013 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета,
д.ф.-м.н., профессор



Мошников В.А.

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы исследования. Развитие современной оптоэлектроники требует все более широкого освоения различных диапазонов оптического спектра. В последнее время большой интерес вызывает ультрафиолетовый (УФ) диапазон. Работающие в этом диапазоне устройства находят широкое применение, как коммерческое, так и военное [1-3]. В коммерческом секторе это: пожарные датчики обнаружения пламени, спектральный анализ биологических и химических веществ, контроль качества пищевых продуктов, приборы для измерения биодоз УФ в медицине (мониторы загара, приборы стерилизации). Среди военных применений можно отметить обнаружение факела двигателей стартующих ракет, слежение за воздушными целями, закрытую связь между искусственными спутниками, поскольку УФ лучи не проникают сквозь озоновый слой земной атмосферы. Во многих случаях желательно, чтобы фотоприемник имел высокую чувствительность в УФ диапазоне и низкую в других областях оптического спектра. Подавление чувствительности в видимой области может быть достигнуто при использовании широкозонных твердотельных фотодетекторов или вакуумных фотоэлементов. Вакуумные приборы отличаются большими размерами, невысокой надежностью и сравнительной дороговизной. Имеющийся в настоящее время набор известных полупроводников с широкой запрещенной зоной позволяет принципиально реализовать любые технические требования. Однако, технология широкозонных материалов и приборов на их основе часто вызывает значительные проблемы, оказывается чрезвычайно затратной, особенно когда речь идет о приемниках с большой чувствительной площадкой. Среди прочих большой практический интерес могли бы представлять кремниевые УФ фотоприемники. Кремний технологичен, имеет низкую стоимость, хорошо освоен промышленностью и фотоприёмники на основе кремния хорошо зарекомендовали себя в оптоэлектронике. Вместе с тем, классические кремниевые фотоприемники отличаются высокой чувствительностью в видимом и ближнем ИК диапазонах и слабой в УФ области. Для повышения УФ чувствительности требуется разработка специальных поверхностно-барьерных структур, уменьшающих влияние поверхностной рекомбинации неосновных носителей заряда. Для снижения чувствительности в видимой области можно использовать УФ светофильтры. Однако, этот вариант приводит к росту цены, кроме того увеличиваются размеры ФП и вносятся дополнительные оптические потери. Интересным является вариант формирования самой структуры ФП, имеющей селективную спектральную чувствительность. Однако, для его реализации требуется разработка специальных технологических процессов, направленных на снижение области собирания фотоносителей, образованных видимым и ИК излучением.

Целью диссертационной работы является разработка кремниевого фотоприемника с высокой избирательной чувствительностью в ультрафиолетовой области спектра.

Для достижения поставленной цели необходимо решение следующих научно-технических задач:

- разработать технологические процессы для получения высокой чувствительности кремниевых фотодиодов (ФД) в УФ области спектра;
- разработать методы анализа и контроля субмикронных полупроводниковых слоев, необходимых при изготовлении УФ фотодиодов;
- разработать технологические процессы для снижения чувствительности кремниевых ФД к видимому и ИК диапазонам без потери чувствительности в УФ части спектра;
- исследовать спектральную чувствительность разработанных фотоприемных структур.

Методы исследования. Для решения поставленных задач проводились вариации технологических методов получения фоточувствительных структур; измерялись электрические параметры, включающие вольт-амперные характеристики, вольт-фарадные характеристики; для исследования спектральных характеристик использовались оптические методы измерения спектральной чувствительности.

Научная новизна работы:

- Установлена высокая эффективность использования субмикронных *p-n*-переходов, сформированных имплантацией мышьяка, для повышения чувствительности кремниевых фотоприемников в УФ области спектра.
- Получена зависимость чувствительности кремниевых ФД в УФ области спектра от дозы имплантации мышьяка. Установлено максимальное значение дозы примеси, превышение которой приводит к спаду фоточувствительности в УФ диапазоне.
- Разработана технология селективных кремниевых фотодиодов с максимумом чувствительности в УФ области спектра.

Обоснованность и достоверность технических и экспериментальных исследований основана на использовании апробированных методик исследования, согласием экспериментальных данных с теорией приборов, широким обсуждением результатов на конференциях и семинарах, включая публикации в рецензируемых журналах.

Практическая значимость полученных результатов состоит в следующем:

- Изготовлены и внедрены в производство широкодиапазонные фотодиоды с высокой чувствительностью в ближнем ультрафиолетовом диапазоне.
- Разработанная технология получения субмикронных *p-n*-переходов может быть использована при изготовлении биполярных и полевых транзисторов СВЧ диапазона.

– Разработана методика анализа концентрационных профилей для субмикронных полупроводниковых слоёв методом послойного травления тестовых структур Ван дер Пау.

– Освоена технология кремниевых ФД со встроенным “тормозящим” полем в базе, позволившая значительно снизить чувствительность УФ фотоприемников в видимом и ИК диапазонах оптического спектра.

Научные положения, выносимые на защиту:

1) Использование процесса ионной имплантации мышьяка позволяет формировать в кремнии субмикронные n^+ - p -переходы с высокой квантовой эффективностью в УФ области.

2) Для сохранения высокой чувствительности в УФ области доза имплантации мышьяка не должна превышать 200 мкКл/см².

3) Использование встроенного тормозящего электрического поля позволяет существенно снизить фоточувствительность в видимой и ближней ИК области.

Апробация результатов исследования. Основные результаты работы докладывались и обсуждались на следующих конференциях и семинарах:

1. Конкурсные работы аспирантов и молодых ученых по направлению “Стратегическое партнерство вузов и предприятий радиоэлектронной промышленности” 2009 г., Санкт-Петербург.

2. XI всероссийская молодежная научная школа “Материалы нано-, микро-, оптоэлектроники и волоконной оптики: физические основы и применение”, 2007 г., Саранск.

3. XII Всероссийская молодежная научная школа “Материалы нано-, микро-, оптоэлектроники и волоконной оптики: физические основы и применение” 2008 г., Саранск.

4. XVI Всероссийская межвузовская научно-техническая конференция студентов и аспирантов “Микроэлектроника и информатика” 2009 г., Зеленоград.

5. IX научно-техническая конференция “Твердотельная электроника. Сложные функциональные блоки РЭА” 2010 г., Звенигород.

6. X научно-техническая конференция “Твердотельная электроника. Сложные функциональные блоки РЭА” 2011 г., Дубна.

7. XV научная конференция НовГУ 2008 г., Великий Новгород.

8. XI Всероссийская научно-техническая конференция “Твердотельная электроника. Сложные функциональные блоки РЭА” 2012 г., Дубна.

9. IV Всероссийская конференция “Физические и физико-химические основы ионной имплантации” 2012 г., Новосибирск.

Публикации. По теме диссертации опубликовано 14 статей, из них – 4 статьи в изданиях, рекомендуемых перечнем ВАК, 10 статей на всероссийских и межвузовских научно-технических конкурсах и конференциях.

Структура и объем диссертации. Диссертация состоит из введения, четырех глав с выводами, заключения. Она изложена на 164 страницах машинописного текста, включает 99 рисунков, 8 таблиц и содержит список литературы из 102 наименований.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении дано обоснование актуальности темы диссертации, сформулирована цель работы, приведены научные положения, выносимые на защиту, отмечены научная новизна и практическая значимость работы.

В **главе 1** «Фотоприемники ультрафиолетового диапазона» приведен сравнительный анализ современного состояния и развития ультрафиолетовых фотоприемников, изготовленных на основе различных полупроводниковых материалов. Рассмотрены УФ датчики на основе арсенида галлия и фосфида галлия; на основе широкозонных материалов, таких как: нитрид галлия, карбид кремния, алмаз, материалы группы $A^{II}B^{VI}$. Описаны особенности каждого из материалов, отмечены преимущества и недостатки разработанных на их основе УФ датчиков. Особое внимание уделено разработкам фотоприемников на основе кремния, как самого популярного, отработанного и хорошо изученного полупроводника. Отмечены основные недостатки классических диффузионных фотоприемников на основе кремния, ограничивающие их использование в качестве УФ датчиков: слабая чувствительность в УФ области на фоне высокой в видимом и ИК диапазонах. Рассмотрены конструкции кремниевых УФ фотодиодов с инверсионным слоем, с барьером Шоттки и мелкозалегающим *p-n*-переходом. Показано, что наибольшей квантовой эффективностью в УФ диапазоне обладали инверсионные фотодиоды. При этом фотодиоды с мелкозалегающим *p-n*-переходом оказались более стабильными при длительном облучении УФ излучением. Поэтому в данной работе эти приборы были взяты за основу. В заключении дана оценка ныне существующим полупроводниковым УФ фотоприемникам. Показано, что для большинства существующих применений УФ фотозлектроники выгодно использовать кремниевые УФ датчики, в связи с их высокой технологичностью и низкой себестоимостью. Указаны и основные недостатки существующих кремниевых аналогов: это высокая чувствительность в видимом диапазоне и слабая воспроизводимость при изготовлении.

В **главе 2** «Технология получения кремниевого УФ фотодиода» рассмотрены основные технологические принципы изготовления экспериментальных образцов фотодиодов с мелкозалегающим *p-n*-переходом. Для оценки требуемой глубины залегания *p-n*-перехода положим, что интенсивность излучения в поглощающей среде ослабляется согласно закону Бугера-Ламберта-Бера:

$$I = I_0 \cdot e^{-\alpha x}, \quad (1)$$

где I – интенсивность прошедшего излучения; I_0 – интенсивность падающего излучения; α – коэффициент поглощения; x – глубина проникновения в ослабляющей среде.

Для ультрафиолетового излучения с длиной волны $\lambda=380$ нм коэффициент поглощения α для кремния составляет $2 \cdot 10^5$ см⁻¹, следовательно, 99% этого излучения поглощается в приповерхностном слое 240 нм. Тогда для получения высокого коэффициента собирания в УФ области целесообразно чтобы глубина p - n -перехода в фотодиоде составляла не более 0,2-0,3 мкм. В главе приведено обоснование выбора легирующей примеси для получения мелкого p - n -перехода, в качестве которой был выбран мышьяк. Благодаря малому коэффициенту диффузии и слабому растворению в окисле во время термического окисления, мышьяк позволяет формировать качественные мелкие p - n -переходы. Легирование мышьяка проводилось методом ионной имплантации. Для оценки профиля торможения были использованы математические модели Линдхарда, Шарфа и Шиота, описывающие процесс ионного легирования примеси. Согласно им, при имплантации ускоренных ионов в неориентированные кристаллы профиль распределения концентрации внедрённых ионов оценивается распределением Гаусса [4]:

$$N(x) = \frac{N_{\square}}{\sqrt{2\pi} \cdot \Delta \bar{R}p} \cdot \exp \left[-\frac{(x - \bar{R}p)^2}{2 \cdot \Delta \bar{R}p^2} \right], \quad (2)$$

где $\bar{R}p$ - средний проецированный пробег; $\Delta \bar{R}p$ - стандартное отклонение; N_{\square} - доза облучения.

Для оценки результирующего профиля после термического отжига, без учета процессов радиационно-ускоренной диффузии, использовалось следующее выражение:

$$N(x, t) = \frac{N_{\square}}{\sqrt{\pi}(\sqrt{2}\Delta R_p + \sqrt{Dt})} \cdot \exp \left[-\frac{(x - R_p)^2}{(\sqrt{2} \cdot \Delta R_p + 2\sqrt{Dt})^2} \right], \quad (3)$$

где D – коэффициент термодиффузии примеси; t – время диффузии.

Кроме расчетных профилей, в данной главе описаны методики экспериментального исследования ионно-легированных профилей мышьяка с помощью анодного окисления, послойного травления и четырехзондовых исследований специально изготовленных тестовых структур Ван-дер-Пау. Окисление структур проводилось в электролите на основе раствора KNO_3 в этиленгликоле при плотностях тока $j = 1,5-3$ мА/см². При известной толщине пленки окисла h_{SiO_2} , эффективная толщина слоя кремния в данной пленке составляла:

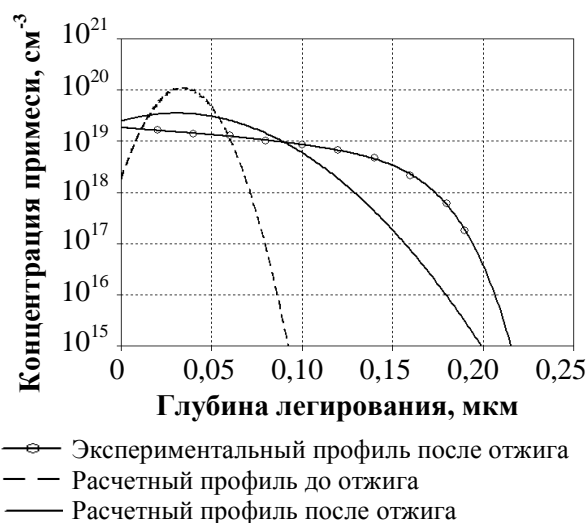
$$\Delta x = h_{SiO_2} \cdot 0,47,$$

Удаление пленки SiO_2 осуществлялось в растворе плавиковой кислоты, что приводило к удалению с поверхности слоя кремния толщиной Δx . Для определения концентрации электрически активной примеси, до окисления и после удаления окисла измерялась

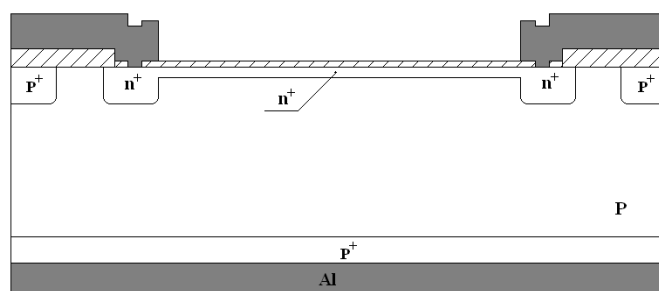
поверхностная проводимость образца $\sigma_s(x)$ четырехзондовым методом. По результатам измерений рассчитывалась удельная электропроводность $\sigma(x)$ по зависимости, удобной для анализа графиков в полулогарифмическом масштабе:

$$\sigma(x) = \sigma_s(x) \cdot \frac{1}{lge} \cdot \frac{d \lg \sigma_s(x)}{dx}. \quad (4)$$

Используя связь между электропроводностью и концентрацией примеси (кривые Ирвина) был построен профиль распределения активированной примеси, представленный на рисунке 1,а (энергия 50 кэВ, доза 50 мкКл/см², отжиг при 1000°С). Здесь же изображены профили имплантированного мышьяка до и после отжига, рассчитанные согласно формулам (2) и (3). Из рисунка 1, а видно согласие теоретических и экспериментальных данных, полученных после отжига. При этом экспериментальный профиль более пологий, чем теоретический, что говорит о наличии дополнительной составляющей коэффициента диффузии. В работе была произведена оценка коэффициента диффузии мышьяка по методу Матано-Больцмана [5] и установлено его повышенное значение в 3-5 раз у поверхности, что, возможно, связано с дефектами, внесенными ионной имплантацией. Поскольку наличие дефектов может увеличивать скорость поверхностной рекомбинации фотоносителей, образованных УФ излучением у поверхности, в работе были проведены исследования влияния дозы имплантации мышьяка на чувствительность фотоприемников в УФ диапазоне. Данные приведены в главе 4. В заключительной части данной главы описана технология изготовления кремниевого УФ фотодиода с мелкозалегающим *p-n*-переходом. Структура прибора представлена на рисунке 1, б.



а)



б)

Рисунок 1 – Теоретические и экспериментальные профили мышьяка (а) и структура разработанного кремниевого УФ фотодиода (б)

Все экспериментальные образцы фотодиодов, исследуемых в данной работе, были изготовлены на предприятии ОАО «ОКБ-Планета», г. Великий Новгород. Исходным материалом для создания фотодиодов служил кремний p -типа проводимости. Фоточувствительная область создавалась имплантацией мышьяка, при этом глубина p - n -перехода составляла 0,2-0,25 мкм. Для обеспечения омического контакта с n^+ -слоем мышьяка по периферийной области фоточувствительного слоя проводилась подконтактная диффузия фосфора на глубину 2-2,5 мкм. Диффузионные p^+ области служили для ограничения каналов инверсии, вносимых зарядом окисла. Размер чувствительной области фотодиодов составил 2,7 x 2,7 мм². Омические контакты формировались напылением алюминия на лицевую и обратную стороны кристалла с последующим вжиганием при температуре 450°С.

В третьей главе «Методика исследования опикоэлектрических свойств фотодиодов» излагаются методики измерения основных метрологических параметров исследуемых приборов. Описано оборудование, использованное для исследования относительной и абсолютной чувствительности фотодиодов. Согласно определению, значение токовой монохроматической чувствительности фотоприемников определяется выражением:

$$S_I(\lambda) = \frac{I_\Phi(\lambda)}{\Phi(\lambda)}, \quad (5)$$

где $I_\Phi(\lambda)$ – фототок диода; $\Phi(\lambda)$ – мощность потока падающего излучения.

В этом случае для определения абсолютной чувствительности необходимо знать величину падающей на фотоприемник мощности монохроматического излучения в единицах энергии, что трудно реализовать на практике. В связи с этим принято пользоваться относительной спектральной чувствительностью. Для более наглядного анализа спектральных характеристик чаще всего пользуются величиной квантовой эффективности, которая рассчитывается следующим образом:

$$\eta(\lambda) = A \cdot \frac{S_I(\lambda)}{\lambda}, \quad (6)$$

где $A = ch/q \approx 1,243 \cdot 10^{-6}$ Дж·м/Кл.

Зависимость $\eta(\lambda)$ может также нормироваться к единице. Исследования спектральных характеристик фотодиодов проводились с помощью монохроматора МДР-29, где источником излучения в диапазоне 220 – 960 нм служила дейтериевая лампа. В качестве эталонного использовался кремниевый фотодиод производства ФТИ им. А.Ф. Иоффе, г. Санкт-Петербург, с размером активной области 18 мм². В главе также описана методика измерения абсолютной токовой УФ чувствительности методом сравнения фотооткликов исследуемого и эталонного фотодиодов. В качестве источника излучения использовался УФ светодиод на основе соединений нитрида галлия, пик интенсивности излучения которого лежал около 360 нм.

Четвертая глава «Способы управления спектральной характеристикой УФ фотодиодов» посвящена описанию серии экспериментов по исследованию различных фотоструктур с целью получения высокой избирательной чувствительности в УФ области спектра. Были проведены исследования зависимости чувствительности фотоприёмников в УФ диапазоне от дозы внедряемого мышьяка при прочих равных условиях. На подложках марки КДБ-10 (концентрация акцепторов $1,2 \cdot 10^{15} \text{ см}^{-3}$) были сформированы четыре типа фотодиодных структур с дозами 5, 50, 500 и 5000 мкКл/см². Спектральные характеристики разработанных ионно-легированных структур представлены на рисунке 2, а. Как видно из полученных зависимостей, значительное снижение чувствительности в УФ области наблюдалось при дозе имплантации 500 мкКл/см². В случае дозы 5000 мкКл/см² чувствительность фотодиодов в УФ области полностью отсутствовала. Более детальные исследования в диапазоне доз 50 – 500 мкКл/см² показали, что заметный спад УФ чувствительности наблюдался при превышении дозы 200 мкКл/см². Для сравнительной оценки фоточувствительности ионно-легированных структур в УФ области были изготовлены инверсионные фотодиоды, технология которых позволяет получить УФ чувствительность, близкую к теоретическому пределу. Также были изготовлены диффузионные фотодиоды с глубиной залегания *p-n*-перехода около 1,5 мкм, которые повторяли технологию классических кремниевых фотодиодов. На рисунке 2, б представлены спектральные характеристики трех изготовленных фотоструктур.

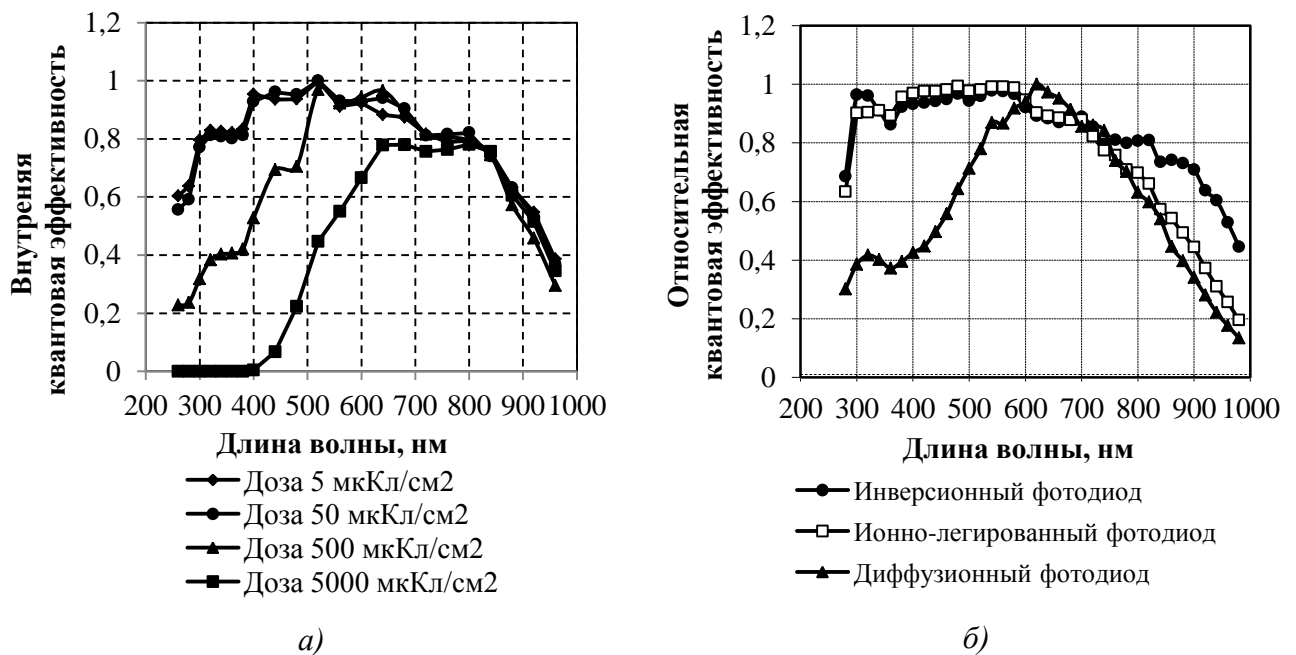


Рисунок 2 – Спектральные характеристики исследуемых ионно-легированных фотоприемников

Видно, что ионно-легированный и инверсионный фотодиоды имеют почти одинаковую высокую чувствительность в коротковолновой области спектра, которая значительно превышала фотоотклик классического диффузионного фотодиода, что свидетельствует о

высокой квантовой эффективности полученных ионно-легированных структур. При этом последние имеют ряд преимуществ перед инверсионными, а именно: высокую стабильность и более широкий динамический диапазон детектируемых мощностей. Для снижения чувствительности в длинноволновой части спектра были изготовлены ионно-легированные фотодиоды на подложках КДБ-0,1 с концентрацией акцепторов около $4 \cdot 10^{17} \text{ см}^{-3}$. Увеличение концентрации акцепторов в 400 раз (по сравнению с вышеописанным материалом КДБ-10) привело к уменьшению диффузионной длины неосновных носителей, образованных в подложке длинноволновым излучением, что позволило снизить чувствительность в видимом и ИК спектрах в 1,5-2 раза по сравнению со фотоструктурами на КДБ-10. Далее была произведена оценка диффузионной длины фотоносителей в базовом материале фотодиодов [6]:

$$L_n = \frac{\chi}{\alpha(1 - \chi)}, \quad (7)$$

где χ – коэффициент собирания фотоносителей, который определялся из спектральной характеристики на длине волны 950 нм, где коэффициент поглощения α составляет $2,2 \cdot 10^2 \text{ см}^{-1}$.

Рассчитанная диффузионная длина неосновных носителей у структуры на КДБ-0,1 составила 6 мкм, а у КДБ-10 – 16 мкм. Другим интересным вариантом ослабления длинноволновой чувствительности является создание в базе фотодиода электрического “тормозящего” поля для неосновных носителей,двигающихся из подложки к *p-n*-переходу. Для этого проводилось дополнительное подлегирование бором базы фотодиода, градиент концентрации которого образовывал встроенное электрическое поле:

$$E(x) = \frac{kT}{q} \frac{1}{N_a(x)} \frac{dN_a(x)}{dx}, \quad (8)$$

Для исследования эффективности данного способа были изготовлены четыре типа структур фотодиодов. Перед операцией имплантации ионов мышьяка, в подложки была проведена диффузия бора на глубины 1, 2, 4 и 8 мкм, с величинами слоевых сопротивлений 600, 300, 150 и 75 Ом/□, соответственно (рисунок 3,а). Выбор значения начальной концентрации бора около 10^{18} см^{-3} связан с тем, что при меньших концентрациях снижается эффект “тормозящего” поля, а при больших ухудшаются электрические характеристики фотодиодов. Очевидно, что наиболее сильным “тормозящим” полем будет обладать структура № 1, что должно привести к большему ослаблению длинноволновой чувствительности. После имплантации мышьяка и формирования контактов, на изготовленных структурах были измерены спектральные характеристики (рисунок 3,б). Из полученных характеристик видно, что все приборы имели ярко выраженную избирательную чувствительность, максимум которой располагался на 400 нм. Как и предполагалось, наименьшей длинноволновой

чувствительностью обладали структуры с самым мелким профилем бора. Рассчитанная по формуле (7) эффективная диффузионная длина неосновных носителей в данных структурах составила около 0,6 мкм, что существенно ниже предыдущих значений (16 мкм для КДБ-10 и 6 мкм для КДБ-0,1).

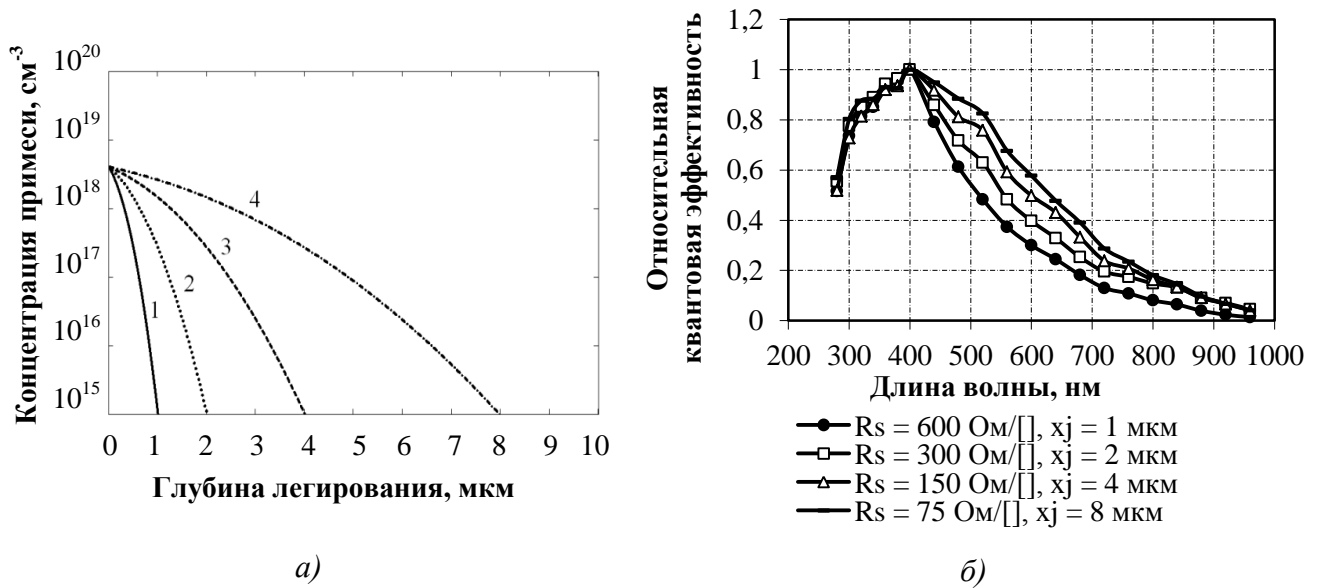


Рисунок 3 – Расчетные профили и спектральные характеристики фотодиодов с различной глубиной диффузии бором

Помимо глубины диффузии бора, градиент концентрации примеси в области p-n-перехода может быть увеличен за счет уменьшения уровня легирования исходного материала. Нами были изготовлены фотодиоды с “тормозящим” полем на подложках марки КДБ-2000, с концентрацией акцепторов около 10^{13} см^{-3} . Полученные приборы действительно обладали меньшей длинноволновой чувствительностью, примерно, в 1,5-2 раза ниже (в области 600-900нм), чем на аналогичных структурах, выполненных на материале КДБ-10.

Для дополнительного повышения избирательности УФ фотодиодов можно использовать УФ фильтры. На рисунке 4, а представлена спектральная характеристика ионно-легированного фотодиода, закрытого фильтром из увиолевого стекла толщиной 4 мм. Здесь же для сравнения представлены спектральные характеристики разработанных ионно-легированных фотодиодов без “тормозящего” поля (широкодиапазонный ФД) и с “тормозящим” полем. Как видно, фотодиод с УФ фильтром имеет окно чувствительности только в области 300 – 400 нм, однако, при этом наблюдается потеря чувствительности в максимуме (350 нм), примерно, на 40%. Альтернативным вариантом внешнему фильтру, как менее дорогим, так и более технологичным, является УФ фильтр, нанесенный на поверхность фотодиода. Нами были исследованы фотодиоды с напылением на них тонких пленок серебра и алюминия (рисунок 4, б) [7]. Из рисунка 4, б видно, что фотоструктуры, покрытые тонким слоем алюминия, не дают желаемого результата, что связано с сильным поглощением в

пленке алюминия. В то же время, фотоструктуры с тонким слоем серебра имеют узкое окно чувствительности только в области 300 – 350 нм. Однако при этом пиковая чувствительность на длине волны около 320 нм была, примерно, в три-четыре раза меньше, чем у обычных структур без серебра. Кроме того, целесообразно провести дополнительные исследования временной стабильности характеристик фотодиодов, покрытых пленкой серебра.

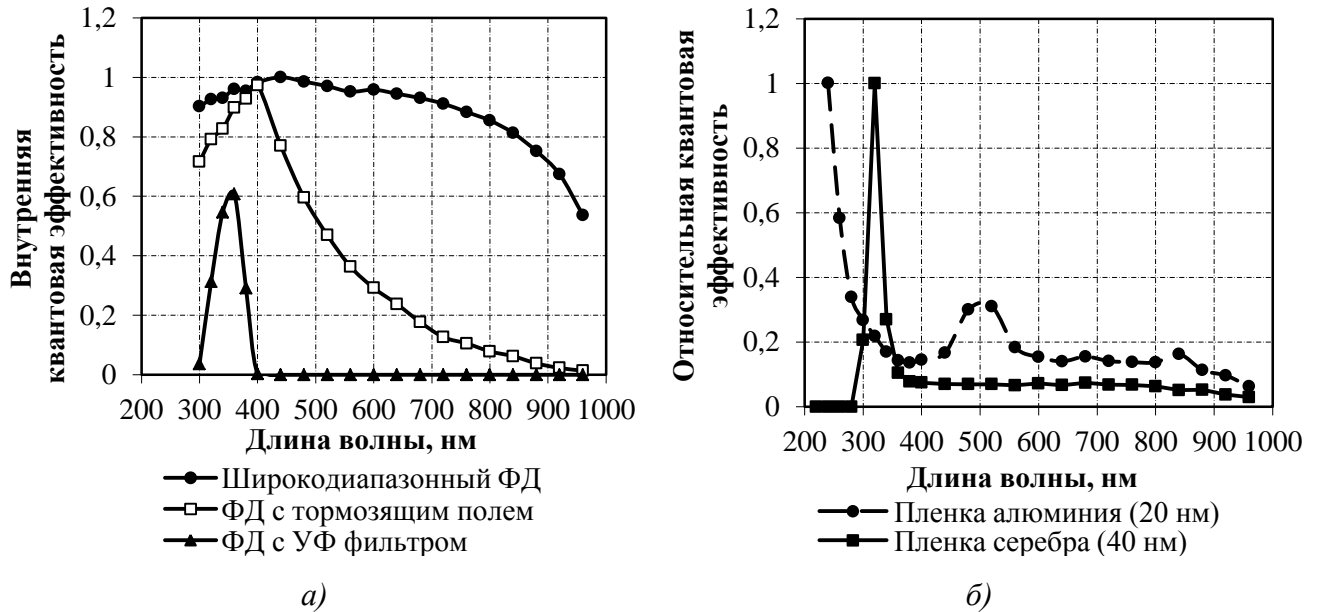


Рисунок 4 – Сравнение спектральных характеристик УФ фотодиодов

В заключительной части данной главы приведены сравнительные характеристики изготовленных фотоприемных структур с аналогами. В качестве примера, на рисунке 5 представлена спектральная характеристика селективного УФ фотодиода с "тормозящим" полем в сравнении с селективным УФ фотодиодом, выполненным на p^+n -структуре (фирма «Hitachi», [8]).

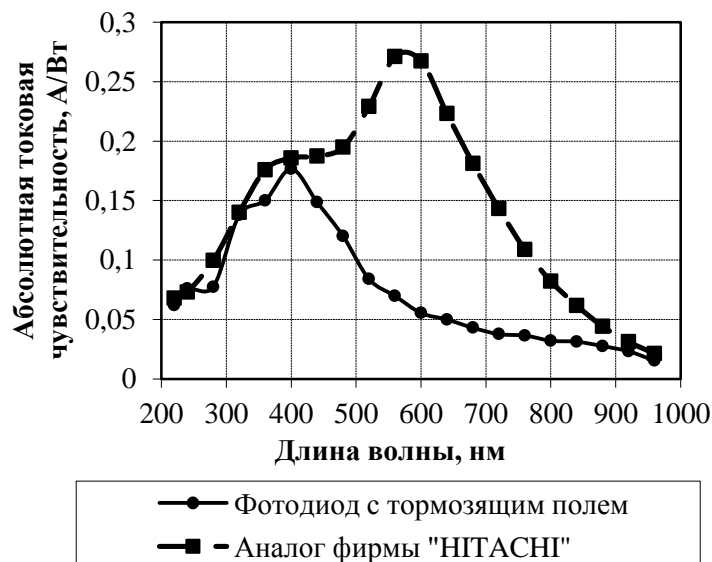


Рисунок 5 – Сравнение спектральных характеристик УФ фотодиодов

Видно, что разработанный селективный УФ фотодиод выгодно отличается от аналога более низкой чувствительностью в видимом и ИК областях спектра.

В **заключении** данной диссертационной работы подводятся общие итоги проведенных исследований. Дается оценка полученным результатам и делаются выводы о выполнении намеченной цели исследований и поставленных задач.

Основные выводы и результаты

1. Разработаны фотодиоды с субмикронными *p-n*-переходами, полученными имплантацией мышьяка, которые показывали высокую чувствительность в УФ диапазоне.
2. Разработаны методики исследования и контроля мелких *p-n*-переходов, полученных методом ионной имплантации мышьяка.
3. Исследована зависимость чувствительности фотодиодов в ближнем УФ диапазоне от дозы имплантации ионов мышьяка. Установлена оптимальная доза, равная 200 мкКл/см².
4. Разработана технология фотодиодов со встроенным “тормозящим” полем в базовой области. Получены образцы фотодиодов со слабой чувствительностью к видимому и ИК диапазонам. Максимум чувствительности располагался на длине волны 400 нм.
5. Исследованы УФ фотодиоды с использованием фильтров на основе тонких пленок металлов. Исследованы фотодиоды с внешним УФ фильтром на основе увиолевого стекла.
6. Разработана методика и проведены исследования абсолютной токовой чувствительности фотоприемников методом сравнения с эталонным фотодиодом. Показано, что разработанные фотодиоды не уступали по УФ чувствительности зарубежным аналогам.

Список цитированной литературы

1. Зотов В.Д. Современные средства детектирования УФ излучений и их применение / В.Д. Зотов, Е.П. Виноградова, Р.С. Грошев // Труды конференции “Технические и программные средства систем управления, контроля и измерения”. – Москва 2010. – С. 533-541.
2. Бланк Т.В. Полупроводниковые фотоэлектропреобразователи для ультрафиолетовой области спектра / Т.В. Бланк, Ю.А. Гольдберг // ФТП. – 2003. – Т.37, вып 9. – С.1025-1055.
3. Ламкин И.А. Солнечнослепые и видимослепые фотодетекторы на основе AlGaIn / И.А. Ламкин, С.А. Тарасов, С.Ю. Курин, В.Н. Жмерик // Тезисы докладов 9-й Всероссийской конференции “Нитриды галлия, индия и алюминия – структуры и приборы”. – Санкт-Петербург, 2013. – С. 115-116.
4. Курносое А.И. Технология производства полупроводниковых приборов и интегральных микросхем / А.И. Курносое, В.В. Юдин. – М.: Высшая школа, 1986. – 368 с.

5. Шоу Д. Атомная диффузия в полупроводниках / Д. Шоу. – М.: Мир, 1975. – 675 с.
6. Васильев А.М. Полупроводниковые фотопреобразователи / А.М. Васильев, А.П. Ландсман. – М.: Сов. Радио, 1971. – 246 с.
7. Baertsch R.D. An Ag-GaAs Schottky-Barrier Ultraviolet Detector / R.D. Baertsch, J.R. Richardson // Journal of Applied Physics. – Jan. 1969. – vol. 40. – number 1. – PP. 229-235
8. Ouchi H. Silicon p-n Junction Photodiodes Sensitive to Ultraviolet Radiation / H. Ouchi, T. Makai, T. Kamei and M. Okamura // IEEE Trans. Electron. – 1979. – ED-26.

СПИСОК ПУБЛИКАЦИЙ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИОННОЙ РАБОТЫ

Публикации в изданиях, включенных в перечень ВАК:

1. Ласткин В.А. Кремниевые фотоприемники с высокой чувствительностью к ультрафиолетовому излучению / В.А. Ласткин, В.В. Гаврушко, А.С. Ионов // Датчики и Системы. – июнь, 2009. – № 6 (121). – С.49–51.
2. Ласткин В.А. Усовершенствованный кремниевый УФ-фотодиод, полученный имплантацией мышьяка / В.А. Ласткин, В.В. Гаврушко, А.С. Ионов // Электроника: наука, технология, бизнес. – 2010. – № 2. – С.72–73.
3. Ласткин В.А. Селективные датчики ультрафиолетового излучения / В.А. Ласткин, В.В. Гаврушко, А.С. Ионов // Вестник Новгородского Государственного университета. – ноябрь 2011. – № 65 – С.17–20.
4. Ласткин В.А. Исследование ионно-диффузионных профилей легирования кремния донорами / В.А. Ласткин, В.В. Гаврушко, А.С. Ионов, Д.А. Стафеев // Вестник Новгородского Государственного университета. – 2008. – № 46. – С.41–43.

Публикации в других изданиях:

5. Ласткин В.А. Исследование фоточувствительности ионно-легированных структур на основе кремния в УФ-области спектра / В.А. Ласткин, В.В. Гаврушко, А.С. Ионов // Сборник трудов 6-й всероссийской молодежной научной школы “Материалы нано-, микро-, оптоэлектроники и волоконной оптики: физические основы и применение”. – Саранск: Изд-во Мордовского университета. – 2007. – С.99–100.
6. Ласткин В.А. Анализ влияния технологических параметров и типа кремниевых фотоприемников на их фоточувствительность в УФ-области спектра / В.А. Ласткин, В.В. Гаврушко, А.С. Ионов // Сборник трудов 7-й всероссийской молодежной научной школы “Материалы нано-, микро-, оптоэлектроники и волоконной оптики: физические основы и применение”. – Саранск: Изд-во Мордовского университета. – 2008. – С.182–184.

7. Ласткин В.А. Влияние степени легирования подложки на чувствительность кремниевых фотодиодов / В.А. Ласткин, В.В. Гаврушко, А.С. Ионов // Тезисы докладов 16-ой Всероссийской межвузовской научно-технической конференции студентов и аспирантов “Микроэлектроника и информатика”. – М: Изд-во ИПК МИЭТ. – 2009 г. – С.78.

8. Ласткин В.А. Кремниевые УФ фотоприемники с низкой чувствительностью к видимому и ближнему ИК диапазонам / В.А. Ласткин, В.В. Гаврушко, А.С. Ионов // Материалы IX научно-технической конференции “Твердотельная электроника. Сложные функциональные блоки РЭА”. – М: Изд-во ФГУП «НПП Пульсар». – 2010. – С.114–116.

9. Ласткин В.А. Селективные датчики УФ излучения на основе кремния / В.А. Ласткин, В.В. Гаврушко, А.С. Ионов // Материалы X научно-технической конференции “Твердотельная электроника. Сложные функциональные блоки РЭА”. – М: Изд-во ФГУП «НПП Пульсар». – 2011 г – С.128–131.

10. Ласткин В.А. Кремниевые фотоприемники с высокой чувствительностью к ультрафиолетовому излучению / В.А. Ласткин, В.В. Гаврушко, А.С. Ионов // Сборник конкурсных работ аспирантов и молодых ученых по направлению “Стратегическое партнерство вузов и предприятий радиоэлектронной промышленности”. – Санкт-Петербург 2009 г. – С.30–35.

11. Ласткин В.А. Определение глубины нарушенного слоя в процессе ионной имплантации / В.А. Ласткин, Д.А. Стафеев // XV научная конференция НовГУ. – Великий Новгород: Издательство ЗАО «Новгородский технопарк». – апрель, 2008.

12. Ласткин В.А. Стенд для измерения спектральной чувствительности фотоприемников в широком спектральном интервале / В.А. Ласткин // Микроэлектроника и информатика. – Москва, 2006 г. – С.134

13. Ласткин В.А. Кремниевые фотоприемники с избирательной чувствительностью в УФ области спектра / В.А. Ласткин, В.В. Гаврушко, А.С. Ионов // XI Всероссийская научно-техническая конференция “Твердотельная электроника. Сложные функциональные блоки РЭА”. – М.: Изд-во ФГУП «НПП Пульсар». – 2012 г. – С.122–125.

14. Ласткин В.А. Исследование ионно-диффузионных профилей легирования кремния мышьяком / В.А. Ласткин, В.В. Гаврушко, А.С. Ионов // IV Всероссийская конференция “Физические и физико-химические основы ионной имплантации”. – Новосибирск, 2012 г.,– С.37.