

05.27.01

ՀԱՅԱՍՏԱՆԻ ՊԵՏԱԿԱՆ ԾԱՐՏԱՐԱԳԻՏԱԿԱՆ ՀԱՄԱԼՍԱՐԱՆ

П-835

ԳՐԻԳՈՐՅԱՆ ԳՈՀԱՐ ԷՂԻԿԻ

ՎԵՐԱԲՅՈՒՐԵՂԱՅՎԱԾ ԲԱԶԱՅՈՎ ՖՈՏՈՐԵՆՂՈՒՆԻՉԱՅԻՆ
ԿԱՌՈՒԹՎԱԾՔՆԵՐԻ ՄՇԱԿՈՒՄԸ ԵՎ ՀԵՏԱԶՈՏՈՒՄԸ

Ե. 27.01. - "ՊԻՆԴ ՄԱՐՄԱՅԻՆ ԷԼԵԿՏՐՈՆԻԿԱ ԵՎ ՄԻԿՐՈԷԼԵԿՏՐՈՆԻԿԱ"

մասնագիտությամբ տեխնիկական գիտությունների թեկնածուի գիտական աստիճանի
հայցման ատենախոսության

ՍԵՂԱՍԳԻՐ

ԵՐԵՎԱՆ - 1998

ГОСУДАРСТВЕННЫЙ ИНЖЕНЕРНЫЙ УНИВЕРСИТЕТ АРМЕНИИ

ГРИГОРЯН ГОАР ЭЛИКОВНА

РАЗРАБОТКА И ИССЛЕДОВАНИЕ ФОТОПРИЕМНЫХ СТРУКТУР С
РЕКРИСТАЛЛИЗОВАННОЙ БАЗОЙ

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени кандидата технических наук
по специальности

Е. 27.01. - ТВЕРДОТЕЛЬНАЯ ЭЛЕКТРОНИКА И МИКРОЭЛЕКТРОНИКА

ЕРЕВАН - 1998

Ատենախոսության բեման հաստատվել է Հայաստանի Պետական Ծախսարագիտական Համալսարանում

Գիտական ղեկավար՝ ֆ. -մ. գ. ք., դոցենտ՝ Ս. Խ. Խոսրովերդյան
Պաշտոնական ընդդիմախոսներ՝ տ.գ.դ., պրոֆ. Ռ. Ռ. Վարդանյան,
Ֆիզ.-մաթ. գ. դ., պրոֆ. Ֆ. Վ. Գասպարյան:

Առաջատար կազմակերպություն՝

"Տրանզիստոր" ԳԱՄ:

Պաշտպանությունը կայանալու է 1998թ. հոկտեմբերի 20-ին, ժամը 14⁰⁰ -ին
ՀՊՃՀ-ի 032 Մասնագիտական խորհրդում՝ ՀՊՃՀ-ի գիտական միասնի դահլիճում,
(հասցեն՝ Երևան, Տերյան փ., 105):

Ատենախոսությանը կարելի է ծանոթանալ ՀՊՃՀ-ի գրադարանում:

Մեղմագիրը առարկած է հոկտեմբերի 20 1998թ.:

032 մասնագիտական խորհրդի գիտական քարտուղար

տ.գ.ք., դոցենտ

Ֆ. Խոսրովերդյան

Է. Խ. Աճեմյան

Тема диссертационной работы утверждена в Государственном Инженерном Университете
Армении

Научный руководитель: канд. физ.-мат. наук, доцент С. Х. Худавердян

Официальные оппоненты: д. т. н., проф. Р. Р. Варданян,

д. физ.-мат. наук, проф. Ф. В. Гаспарян

Ведущая организация:

НПО "Транзистор"

Защита диссертации состоится 20 октября 1998г. 14⁰⁰ ч. на
заседании специализированного совета 032 в ГИУА (адрес: Ереван, ул. Теряна 105).

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ГИУА.

Автореферат разослан 20 сентября 1998г.

Ученый секретарь специализированного совета 032

к.т.н., доцент

Ֆ. Խոսրովերդյան



2993-98

ОБЩЕЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Актуальность темы. Сверхбольшие интегральные схемы достигли предела минимизации уже в начале 90-х годов, после чего дальнейшее увеличение плотности упаковки и выполняемых функций зависит от успехов технологии вертикальной интеграции. Основой технологии трехмерных интегральных схем является рекристаллизация лазерным лучом поликристаллических полупроводниковых слоев, и по этой причине, область исследования влияния лазерного луча на свойства кристаллических структур в настоящее время находится в центре внимания исследователей. Трехмерные интегральные схемы (ТМИС) состоят из множества вертикально наложенных активных слоев, разделенных изолирующими материалами, в которых располагаются различные приборы и функциональные устройства, например запоминающие устройства, фотоприемники электромагнитного излучения и т.д.. В результате этого в ТМИС, по сравнению с двумерными интегральными схемами, заметно может быть увеличена плотность упаковки и функционирования.

В области развития ТМИС очень актуально формирование многофункциональных активных элементов, в частности, датчиков электромагнитного излучения, во втором и последующих рекристаллизованных слоях. Эти датчики, наряду с высокой эффективностью регистрации излучения, должны обладать высоким быстродействием, т.к. рекристаллизованная базовая область очень узкая ($\leq 1 \mu\text{км}$) и обеспечивает малые времена пролета носителей заряда через эту базу ($\approx 10^{-12}$ с).

Были успешные попытки создания фотодиодов во втором слое с мелким р-р-переходом, у которых токи утечки не превышали 10^{-13} А/мкм². Сведения о формировании рекристаллизованного слоя на металлической пленке в известной нам литературе отсутствуют. Между тем, если на металлической пленке провести рекристаллизацию тонкого слоя полнкремния, то в процессе рекристаллизации может образоваться тыловой барьер Шоттки, и становится возможным получение структуры М-П/П-М с двумя противоположно направленными барьерами Шот-

тки, с результирующим фотооткликом, выгодно отличающимся от фотоотклика однобарьерной структуры. Некоторые недостатки, присущие барьерам Шоттки (деградация поверхностных барьеров и наличие диэлектрического зазора), можно устранить созданием силицидных барьеров, сохранив и даже, при короткой базе, увеличив выстродействие и коротковолновую фоточувствительность барьеров Шоттки вплоть до ультрафиолетовой области спектра.

Целью диссертационной работы являлась: на базе промышленного оборудования разработать технологию получения силицид-кремний-силицид выстродействующих фотоприемных структур с высокой фоточувствительностью в ультрафиолетовой области спектра как активный элемент трехмерных интегральных схем, а также исследование электрофизических и фотоэлектрических характеристик полученных структур.

Для достижения поставленной цели необходимо было решить следующие задачи исследования:

1. Теоретически обоснованный выбор технологически легко создаваемой силицид-полупроводник-силицид фотоприемной структуры;
2. Разработка методов изготовления и исследования фотоприемных силицид-металл-силицид структур;
3. Определение влияния параметров исходного материала на фотоэлектрические свойства разработанных структур;
4. Теоретическое и экспериментальное исследование комплекса электрофизических и фотоэлектрических характеристик структур и физическое объяснение результатов исследования.

Научная новизна работы:

1. Впервые разработан технологический режим рекристаллизации поликристаллического кремния на металлической основе и получения тылового силицидного барьера в одном технологическом цикле;
2. Впервые разработана конструкция силицид-кремний-силицид фотоприемных структур и технология их получения;

3. Впервые выведено математическое выражение светового, темнового и результирующей вольт-амперных характеристик (ВАХ) для структур с высокоомной базовой областью;
4. Обнаружен, теоретически и экспериментально обоснован эффект смены знака фототока; исследованы закономерности смещения точки "0", коротковолнового и длинноволнового максимумов от приложенного внешнего напряжения интенсивности освещения и концентрации примесей исходного материала;
5. Для положительных и отрицательных значений фототоков определены пороги чувствительности и выстродействия предложенных структур.

На защиту выносятся следующие основные положения диссертационной работы:

1. с помощью разработанной на базе промышленного оборудования технологии получения силицид-кремний-силицид структур получены фотоприемные двухбарьерные структуры NiSi_2 - n-Si - TiSi_2 с рекристаллизованной тонкой базовой областью;
2. полученные выражения ВАХ для темновых, световых и результирующих токов предложенных двухбарьерных структур, базовая область которых достаточно высокоомная и полностью перекрыта областями объемных зарядов двух переходов. Эти выражения позволяют полностью раскрыть функциональные возможности предлагаемых структур;
3. расчеты и экспериментальные исследования электрофизических и фотоэлектрических характеристик предложенных структур, подтверждают существование высоких значений коротковолновой фоточувствительности и выстродействия, а также малые пороги чувствительности;
4. эффект смены знака фототока и исследования эффекта при разных интенсивностях освещения, напряжениях смещения и концентрации примесей исходного материала, позволили выявить области изменения точки инверсии фототока на спектральной характеристике, положение длинноволнового и коротковолнового максимумов.

Практическая ценность работы заключается в сочетании хорошей фоточувствительности созданных структур с высоким быстродействием, а также существовании точки нуля на спектральной характеристике, положительного и отрицательного максимумов фототоков и их зависимость от внешних факторов. Структуры могут использоваться при малых напряжениях смещения для регистрации излучения в ближней ультрафиолетовой и коротковолновой областях спектра.

Имеется также заключение о возможности использования предложенных фотоприемных структур в создаваемых по программе НАТО приборах для контроля и регулирования примесей в оптически прозрачных растворах оптоэлектронным методом.

Апробация работы. Материалы диссертационной работы докладывались и обсуждались на:

- Научных семинарах кафедры М и БМП ГИУА;
- Первой международной конференции по применению критических технологий для потребностей общества, Ереван, сентябрь 1995;
- Годовых конференциях ГИУА, Ереван, декабрь 1996г. и ноябрь 1997г.;
- Первой национальной конференции по полупроводниковой микроэлектронике, Дилижан, май 1997г.;

Публикации. Основные результаты диссертационной работы опубликованы в трех научных публикациях, получено одно авторское свидетельство и сдана в печать одна статья.

Объем работы. Диссертация состоит из введения, 3 глав, выводов, списка литературы и одного приложения.

Объем диссертации составляет 112 страниц, включая 37 рисунков и 4 таблиц. Список использованной литературы включает 105 наименования отечественных и зарубежных источников.

Во введении обоснована актуальность темы, поставлена цель работы, рассмотрена ее структура, сформулированы новизна и практическая ценность диссертации, положения, выносимые на защиту.

В первой главе, посвященной обзору литературы, кратко изложены и критически проанализированы результаты работ по изучению тех свойств Si и контакта металл-полупроводник, которые необходимы для решения поставленной задачи. Приведены основные характеристики поверхностно-барьерных фотоприемных структур, отмечены известные пути их улучшения. Описаны основные методы рекристаллизации, а также раскрыты теоретические предпосылки создания активных элементов трехмерных схем с использованием барьера Шоттки, в частности, фотоприемников коротковолнового излучения.

Из обзора литературы следует, что сочетание высоких фоточувствительности в УФ области спектра и быстродействия можно получить созданием поверхностно-барьерных структур с тонкой базовой областью. Однако, эти структуры имеют ряд недостатков, среди которых основными являются: размытая спектральная фоточувствительность, деградация поверхностных состояний под воздействием внешних факторов и связанные с этим нестабильности параметров.

Размытость спектра фоточувствительности связана, в основном, с конструкцией поверхностно-барьерных фотодиодов. В них базовая область формируется в кремневой подложке, после которой имеется длинная "паразитная" область $\approx 200\mu\text{м}$, где поглощается длинноволновое излучение. По этой причине спектральная фоточувствительность поверхностно-барьерных фотодиодов, хотя и смещена в коротковолновую область, но не является селективной. Уменьшить долю длинноволнового поглощения можно устранением "паразитной" области, при этом существенно уменьшится время пролета через базу и увеличится быстродействие. Вопросы надежности можно решить созданием силицидных контактов, когда металл частично диффундирует в кремний, создавая тонкий поверхностный слой, менее подверженный влиянию внешних факторов. Кроме того, в таких структурах отсутствует диэлектрический зазор, что немаловажно для эффективного токопрохождения.

В связи с этим была поставлена задача определить возможность формирования тонкой базовой области на металлической основе, обеспечив тем самым,

ярко выраженную коротковолновую чувствительность, и, одновременно, решить проблему надежности предлагаемых структур. Использование метода лазерной рекристаллизации, как сравнительно низкотемпературного метода получения монокристаллических пленок на металлической основе, дает возможность получить силицид-кремний-силицид структуры с высокой селективной чувствительностью в ближней ультрафиолетовой и коротковолновой областях спектра и повышенной защищенностью поверхностных барьеров.

В свете выше сказанного в обзоре литературы сформулированы предпосылки создания выстродействующих фотоприемников с высокой фоточувствительностью в ближней ультрафиолетовой и коротковолновой областях спектра и задачи исследования.

Во второй главе описана разработанная технология изготовления фотоприемных структур с силицидным барьером Шоттки. Описана методика получения рекристаллизованного слоя на металлической пленке. Обоснованы технологические режимы получения силицидных барьеров Шоттки по обе стороны рекристаллизованного слоя, выведено аналитическое выражение, с помощью которого определен технологический режим рекристаллизации тонких слоев кремния, дано описание ранее созданного поверхностно-барьерного фотодиода Al -n-Si-TiSi₂ с высокой фоточувствительностью в коротковолновой области спектра.

В технологии изготовления оригинальным является получение n-базы и силицида TiSi₂ в одном технологическом цикле рекристаллизации тонкого (<1мкм) поликристаллического кремния. Из линейного участка на прямой ветви ВАХ фотодиода Al -n-Si- TiSi₂ экспериментально была определена величина тока, протекающего через структуру, а по нему оценено значение подвижности носителей заряда, которое составило величину 555см²/Вс для электронов. Высота образованного в единичном технологическом цикле тылового силицидного TiSi₂ барьера была определена по вольт-фарадной характеристике Al -n-Si- TiSi₂ диода и составила 0,6 эВ. Базовая область достаточно высокоомная, с концентрацией примесей ≤ 10¹⁵ см⁻³.

Найдены технологические режимы рекристаллизации: мощность лазера в непрерывном режиме P=20 Вт, длина волны падающего лазерного излучения λ=1,06 мкм, диаметр пучка на пластине d=0,1 мм, температура окружающей среды t = 600°C, время облучения t₀=2,5·10⁻³с, скорость сканирования 4,5 см/с.

Ширина рекристаллизованной базовой области равна 1 мкм. Фоточувствительная площадь около 0,01 мм².

Теоретически и экспериментально обоснован выбор металлов (титан и никель) для создания силицидных контактов, исходя из следующих соображений:

- температура образования тылового TiSi₂ силицида выше (T_{обр.}=650 °C), следовательно, при образовании второго силицидного барьера NiSi (T_{обр.}=400 °C), характеристики тылового барьера не изменятся;
- силициды этих металлов имеют оптимальные параметры для создания фотоприемников на их основе в ТМНС.

Низкотемпературные процессы предложенного цельного технологического цикла обеспечивают возможность его использования при создании трехмерных интегральных схем, а конструкция и параметры предложенных структур обеспечивают низкий уровень используемых напряжений и выходных токов, что также немаловажно для СБИС.

Описаны также экспериментальные установки для проведения рекристаллизации тонких поликристаллических полупроводниковых слоев, а также экспериментальные установки, позволяющие провести исследования всего комплекса электрофизических и фотоэлектрических характеристик предложенных структур.

В третьей главе рассмотрены электрофизические и фотоэлектрические характеристики NiSi -n-Si- TiSi₂ структур (рис. 1). Основное внимание уделяется исследованию характеристик структур и физическому объяснению результатов исследования, а также эффекту смены знака фототока в зависимости от длины волны падающего на образец электромагнитного излучения при приложении как прямого, так и обратного напряжений смещения.



Рис. 1. Конструкция фотоприемной NiSi- n-Si -TiSi₂ структуры.

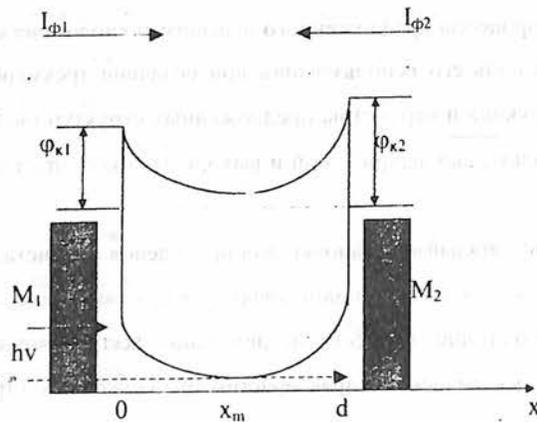


Рис. 2. Энергетическая зонная диаграмма структуры NiSi- n-Si -TiSi₂.

Минимум энергетического потенциала x_m (рис. 2.) (ширина объемного заряда первого перехода) зависит как от высот двух барьеров, так и от приложенного внешнего напряжения (эта зависимость аналогична и для ширины ОПЗ второго перехода ($d-x_m$)) и определяются по формулам

$$x_m = 0,5d + \frac{\epsilon \epsilon_0 (\Delta\phi_k \pm qU)}{q^2 n d} \quad \text{и} \quad d-x_m = 0,5d - \frac{\epsilon \epsilon_0 (\Delta\phi_k \pm qU)}{q^2 n d},$$

где $\Delta\phi_k = \phi_{\kappa 1} - \phi_{\kappa 2}$ -разница высот двух барьеров Шоттки, а $U = U_1 + U_2$ приложенное внешнее напряжение, U_1 и U_2 - напряжения на барьерах, n - концентрация примесей в базовой области. Если концентрация примесей в базе такова, что ширина областей объемных зарядов обоих переходов больше полуширины базы, то эти области перекрываются и эффективно взаимодействуют. При отсутствии внешнего напряжения, с увеличением концентрации носителей заряда происходит сужение областей объемных зарядов двух барьеров, и при определенных концентрациях может быть меньше, чем $0,5d$ и взаимодействие барьеров становится менее эффективным. Зависимость ширины областей первого (x_m) и второго ($d-x_m$) переходов от концентрации примесей в базовой области для структур с двумя противоположно направленными барьерами показана на рис.3, где точка пересечения кривых дает ту максимальную концентрацию ($n_{max} = 2,66 \cdot 10^{15} \text{ см}^{-3}$), при которой вся базовая область перекрыта областями объемных зарядов двух барьеров. Выше этой концентрации точка минимума потенциала (рис. 2.) исчезает, т.к. энергетические барьеры двух контактов локализуются, оставляя между собой неохваченную базовую область.

Из рис. 3. видно также, что точка пересечения не находится на $0,5d$, т.к. высоты барьеров двух контактов разные, и смещена в сторону барьера с меньшей величиной. Поэтому, проекция точки пересечения на оси x_m равна не $5 \cdot 10^{-5}$ см, а $4,7 \cdot 10^{-5}$ см, а при $5 \cdot 10^{-5}$ см, соответственно концентрация носителей заряда для кривой x_m $n = 2,44 \cdot 10^{15} \text{ см}^{-3}$ и для ($d-x_m$) $n = 2,97 \cdot 10^{15} \text{ см}^{-3}$. Зависимость ширины первого барьера x_m от напряжения смещения (для второго барьера аналогично)

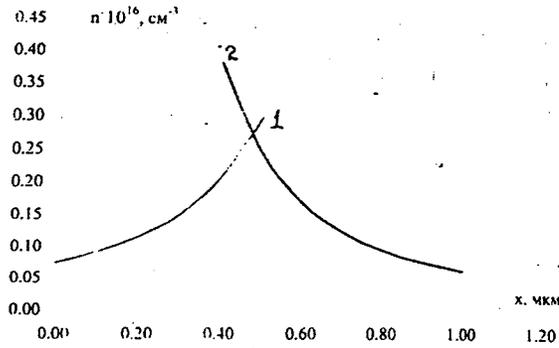


Рис.3. Изменение ширины области первого (\$x_m\$) и второго (\$d-x_m\$) барьеров от концентрации примесей в базовой области для NiSi-n-Si-TiSi₂ структур.

оказалась линейной, т.к. \$x_m\$ может изменяться от 0 до \$10^{-4}\$ см, то диапазон значений напряжения смещения, при котором взаимодействие барьеров все еще ощутимо, находится в пределах от -0,5 до +0,5 В.

Как уже отмечалось выше, в структурах силицид-кремний-силицид образующиеся барьеры противоположно направлены, следовательно, результирующий фототок, протекающий через структуру, есть разность токов через отдельные переходы. Нами получено выражение для результирующего фототока через силицид-металл-силицид структуру:

$$I_{\Phi} = q S \Phi \beta (1 - 2e^{-\alpha x_m} + e^{-\alpha d}) \quad (1)$$

где \$\Phi\$ - часть падающих в единицу времени на единицу поверхности квантов, поглощенных в образце, \$\beta\$ - квантовая эффективность, \$S\$ - светочувствительная площадь, \$\alpha\$ - коэффициент поглощения.

Для вывода общего выражения ВАХ мы можем воспользоваться выражением для дрейфовой составляющей тока, характерной для структур с одним барьером Шоттки. При выводе ВАХ мы не учитываем влияние диэлектрического зазора на ток через структуру, диффузионную и генерационно-рекомбинационную составляющие токов, а также ток туннелирования. Эти факторы обычно

снижают эффективность регистрации фотосигнала. Причиной, по которым учитываются эти факторы, следующие:

1. по разработанной технологии, в создаваемых нами NiSi-n-Si-TiSi₂ структурах, исключалось существование диэлектрического зазора;
2. с выбором высокоомной (\$n \le 10^{15} \text{ см}^{-3}\$) тонкой (\$\le 1 \text{ мкм}\$) базы обеспечены следующие основные условия:
 - исключались токи туннелирования, которые характерны для концентраций примесей в базовой области \$\ge 10^{17} \text{ см}^{-3}\$,
 - ширина базы много меньше диффузионной длины неосновных носителей, что существенно уменьшает вероятность генерационно-рекомбинационных и диффузионных токов, тем более, что база целиком охвачена областями пространственных зарядов двух барьеров, обеспечивающих доминирование дрейфовой составляющей тока.

Для получения выражения для темновых токов, необходимо учитывать распределение внешнего напряжения на двух противоположно направленных барьерах. Отношение сопротивлений этих барьеров меняется в линейной зависимости от отношения ширины областей их объемных зарядов, поэтому если внешнее напряжение \$U_m\$ падает на базу с толщиной \$d\$, то доля напряжения, падающая соответственно на первый и второй барьеры, будет равна

$$U_1 = \frac{U_m x_m}{d} \quad \text{и} \quad U_2 = \frac{U_m (d-x_m)}{d}$$

С учетом вольт-амперной характеристики барьера Шоттки при отсутствии диэлектрического зазора (при силицидном барьере), для результирующего темнового тока получено следующее выражение

$$I_t = I_{t1} \left(\exp \frac{qU x_m}{d kT} - 1 \right) - I_{t2} \left(\exp \frac{-qU(d-x_m)}{d kT} - 1 \right), \quad (2)$$

где

$$I_{s1} = \frac{qV_n n}{4} \exp\left(-\frac{q\phi_{k1}}{kT}\right) \quad \text{и} \quad I_{s2} = \frac{qV_n n}{4} \exp\left(-\frac{q\phi_{k2}}{kT}\right)$$

токи утечки для первого и второго барьеров соответственно.

С учетом световых токов (1), общее выражение для ВАХ примет вид:

$$I = qS\Phi\beta(1 - 2e^{-\alpha x_m} + e^{-\alpha d}) + I_{s1}(e^{(qU - X_m)/dkT} - 1) - I_{s2}(e^{-qU(d - X_m)/dkT} - 1). \quad (3)$$

При освещении образцов из области видимого света на ВАХ М-П/П-М структур с двумя противоположно направленными цилиндрическими барьерами NiSi и TiSi₂ наблюдалась смена знака фототока в зависимости от приложенного напряжения смещения.

Увеличение длины волны падающего на образец излучения смещало точку смены знака фототока в сторону больших значений напряжения смещения. Это изменение особенно заметно при отрицательных значениях напряжения (U = -0,48В при λ = 0,4 мкм и U = -0,12В при λ = 0,5 мкм, рис. 4.), а уже при незначительных положительных значениях напряжения смещения при любом значении длины волны падающего излучения становится положительным. Это объясняется тем, что при положительных значениях напряжения смещения высота первого потенциального барьера увеличивается, а потом становится и более, чем высота второго потенциального барьера. В результате чего фототок первого барьера при положительных напряжениях смещения становится доминирующим.

Из рис. 4. видно также, что темновой ток становится больше светового при значениях напряжения смещения +0,5 В на положительном участке и -0,4 В на отрицательном участке. В диапазоне напряжения смещения от -0,4 В до +0,4 В можно с уверенностью сказать, что фототоки (~10⁻⁸ А) значительно превышают темновые (~10⁻¹¹ А) и, следовательно, темновым током можно пренебречь.

Особенно наглядно смена знака фототока видна на спектральной характеристике (структуры освещались через полупрозрачный никелевый контакт, рис.5).

С увеличением ширины области объемного заряда I-ого барьера (x_m = 0,1 ÷ 0,5 мкм), положительный фототок через него увеличивается, и для спектральной

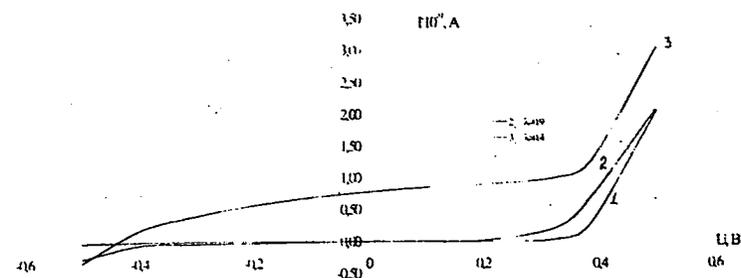


Рис.4. ВАХ структуры NiSi -n-Si- TiSi₂, кр.1- темновой ток, кр. 2 и 3 - фототок (длины волн падающего излучения указаны во вставке).

максимум, длинноволновый спад которого является результатом увеличения противоположно-направленного фототока второго барьера, а также "хвостовых" потерь, поскольку уже с λ > 0,5 мкм (исходя из закона Бугера-Ламперта), главная проникновенная квантов больше, чем ширина базы. Коротковолновый спад можно объяснить уменьшением количества квантов падающего излучения при одинаковой мощности, из-за увеличения энергии одного кванта. При λ > 0,3 мкм, с увеличением x_m, наблюдается рост фототока вплоть до максимального значения (λ = 0,4 мкм). Это объясняется тем, что в диапазоне длин волн 0,3 < λ ≤ 0,4 мкм, при малых значениях x_m, не все фотогенерированные носители разделяются полем первого перехода. С увеличением x_m, при одинаковой мощности падающего излучения увеличивается число фотогенерированных носителей, разделенных первым переходом. Однако это увеличение замедляется, так как число разделенных первым переходом носителей приближается к максимуму. Это приводит к насыщению фоточувствительности. При очень коротких длинах волн (λ = 0,2 ÷ 0,3 мкм) эта закономерность также сохраняется, но уже с x_m ≥ 0,2 мкм фотогенерированные вблизи поверхности коротковолновым излучением носители успевают разделить

полем ОПЗ практически без потерь.

Максимум положительного фототока, с увеличением ширины ОПЗ первого барьера x_m , смещается в сторону длинных волн, причем это смещение более заметно при малых значениях x_m . При $x_m > 0,2$ мкм смещение максимума незначительно. Это можно объяснить также величиной разделяющего поля ОПЗ. При малых значениях x_m поле, которое разделяет фотогенерированные носители, мало и достаточно только для разделения фотоносителей, генерированных вблизи поверхности (при коротковолновом поглощении). При увеличении x_m поле ОПЗ также увеличивается и позволяет разделять уже и те фотоносители, которые генерируются при сравнительно длинноволновом поглощении, что и приводит к смещению максимума в сторону длинных волн (от $\lambda_{max}=0,3$ мкм при $x_m=0,1$ мкм до $\lambda_{max}=0,4$ при $x_m=0,5$ мкм).

Закономерности для фототока, протекающего через второй барьер, аналогичны, с той разницей, что увеличение фототока происходит при увеличении ширины области объемного заряда второго перехода, то есть уменьшении x_m . Уменьшение длинноволнового отрицательного фототока (рис.5) является результатом "хвостовых" потерь, однако при одних и тех же длинах волн (например $\lambda=0,8$ мкм) фототок $I_{\phi 2}$ при $d-x_m \gg x_m$ значительно больше $I_{\phi 1}$ (тыловой барьер расположен на большей глубине от поверхности). Коротковолновый спад является результатом с одной стороны уменьшения числа поглощенных квантов (или фотогенерированных носителей) при одинаковой мощности падающего излучения; с другой стороны-уменьшения глубины поглощения, то есть его удаленности от тылового барьера. Максимум отрицательного фототока, с увеличением ширины области пространственного заряда второго перехода, стремится в коротковолновую область, что естественно, так как, чем шире ОПЗ тылового перехода, тем больше число разделенных им фотоносителей, генерированных коротковолновым излучением. Это смещение происходит от $\lambda=0,5$ мкм при $x_m=0,5$ мкм до $\lambda=0,4$ мкм при $x_m=0,1$ мкм. Поскольку, фототоки $I_{\phi 1}$ и $I_{\phi 2}$ являются токами двух встречно

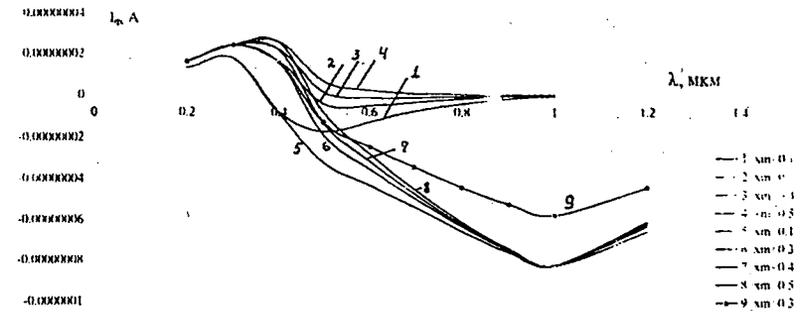


Рис.5. Спектральная характеристика NiSi -n-Si- TiSi₂ структур без учета (кр.1-4) и с учетом (кр. 5-8) "хвостового" поглощения и экспериментальная кривая 9. Мощность падающего излучения $P=10^{-7}$ Вт.

направленных переходов (рис.2), то на спектральной характеристике появляется смена знака результирующего фототока через структуру (рис.5). При этом, из-за взаимовлияния этих переходов, происходит смещение максимумов: коротковолнового в сторону более коротких длин волн (по сравнению с однопереходной структурой), и длинноволнового в сторону более длинных волн. Смещение длинноволнового максимума более заметно и объясняется законом Буггера-Ламберта, что и приводит к большему влиянию первого барьера на второй, а не наоборот.

Точка смены знака на спектральной характеристике смещается в сторону длинных волн с увеличением ширины области объемного заряда первого перехода. При $x_m \geq 0,5$ мкм явление смены знака фототока уже отсутствует, что свидетельствует о доминирующей роли первого барьера.

Увеличение фототока в структурах NiSi -n-Si- TiSi₂ получено за счет внутреннего отражения длинноволнового излучения от противоположных контактов, приводящее к увеличению эффективности поглощения (экспериментальная кр. 9 на рис. 5). Результирующий коэффициент отражения оказался равным 0,3. На рис. 5. представлены также спектральные кривые для структур NiSi -n-Si- TiSi₂, и, построенные, как без учета "хвостовой" части поглощенных квантов (кр. 1-4), так и с учетом общего числа поглощенных квантов (кривые 5-8), приведенные

для одинаковой мощности падающего излучения ($P=10^{-7}$ Вт) при разных значениях ширины первого (второго) барьера. Максимумы длинноволнового фототока значительно больше с учетом "хвостовой" части и находятся в области собственного поглощения, чем без него. Этим и объясняется смещение точки смены знака фототока в сторону коротких длин волн.

Расчетная токовая монохроматическая фоточувствительность NiSi -n-Si-TiSi₂ структур, при коротких длиннах волн падающего на образец излучения оказалась значительно выше, чем при длинных. Это объясняется тем, что глубина поглощения длинноволнового излучения, а следовательно и "хвостовые" потери, много больше, чем коротковолнового. Насыщение коротковолновой фоточувствительности наступает при более малых значениях напряжения смещения, чем длинноволновой. При этом уменьшение интенсивности падающего на образец излучения не меняет ход нарастания фоточувствительности. Причиной этого является глубина генерации носителей заряда. В первом случае генерация происходит вблизи поверхности и сравнительно небольшое обратное напряжение обеспечивает максимальное разделение носителей заряда; а во втором случае, генерация происходит на большей глубине и требует большее обратное смещение первого барьера для полного разделения носителей. Минимумы фоточувствительности соответствуют точке "0", после которых происходит рост отрицательного фототока, а следовательно, и новый рост абсолютного значения фоточувствительности.

В общем случае, инерционность фотоприемников определяется тремя процессами: временем диффузии или дрейфа неравновесных носителей через базу $\tau_{др}$; временем их пролета через область объемного заряда p-n-перехода τ_i ; постоянной времени τ_{RC} . Для структур NiSi-n-Si-TiSi₂ время дрейфа неосновных носителей $\tau_{др} \approx 10^{-10}$ с, время их пролета через область объемного заряда p-n-перехода $\tau_i \approx 2 \cdot 10^{-11}$ с, а постоянная времени $\tau_{RC} \approx 2,5 \cdot 10^{-12}$ с. Учитывая, что $(1/\tau) = \sum_i (1/\tau_i)$, быстродействие в NiSi -n-Si- TiSi₂ структурах определяется постоянной времени τ_{RC} и окажется порядка 10^{-12} с.

Были исследованы также шумовые характеристики NiSi-n-Si- TiSi₂ структур при разных значениях фонового тока. Во всех случаях мощность эквивалентная шуму NEP уменьшалась с увеличением эквивалентного сопротивления R_{eq} до значения последнего в пределах $5 \cdot 10^6$ Ом, после чего значение NEP не меняется, оставаясь ниже при $\lambda = 0,9$ мкм по сравнению с $\lambda=0,4$ мкм. Это объясняется тем, что при больших энергиях квантов ($h\nu > E_g$), только часть энергии квантов идет на генерацию электронно-дырочной пары, остальная же в виде фононов участвует в разогреве кристаллической решетки, и увеличивает тепловые шумы структуры.

Оценены минимальные значения порогов чувствительности при $R_{eq}=10^7$ Ом, которые оказались в диапазоне от 10^{-14} ВтГц^{-1/2} до 10^{-13} ВтГц^{-1/2}. Была исследована зависимость мощности эквивалентной шуму от длины волны падающего на образец излучения при разных значениях фонового тока. При нулевом фоне мы имеем уменьшение порога чувствительности от $3 \cdot 10^{-13}$ ВтГц^{-1/2} при $\lambda=0,2$ мкм до 10^{-11} ВтГц^{-1/2} при $\lambda \geq 0,42$ мкм. При наличии фонового тока пороги чувствительности ухудшаются, что сильнее сказывается в области коротких ($\lambda < 0,4$ мкм) длин волн; при $\lambda = 0,43$ мкм наблюдается минимум, который с увеличением значения фонового тока, становится ярче выраженным. Этот минимум совпадает с длинами волн, при которых происходит смена знака фототоков. При $\lambda > 0,43$ мкм порог чувствительности ухудшается, проходя через максимум при $\lambda \approx 0,5$ мкм, что совпадает с длинноволновыми максимумами на спектральной характеристике (рис. 5).

В созданных фотоприемниках достигнуты высокие значения фоточувствительности в широком диапазоне видимого и ультрафиолетового областей спектра.

Достигнутые параметры приводятся в сравнении с параметрами существующих заводских фотоприемников в таблице 1.

Основные результаты и выводы по диссертационной работе таковы:
 1. Обобщены литературные данные и обоснованы возможности создания силицид-кремний-силицид фотоприемных структур с двумя противоположно на

Таблица 1

Имя прибора	Площадь фоточувствительного элемента, [мм ²]	Диапазон спектр. хар-ки, Δλ [нм]	Максимальная спектр. хар-ка Δλ _{max} [нм]	Рабочее напряжение U, [В]	I _{нап} [мкА] не более	S(λ), [А/Вт]	Импульсная постоянная времени, τ, [с], не более	Порог чувств.-ти Φ _{нап} , [Вт Гц ^{-0,5}]
1. фотодиод ФД-256	1,37	0,4-1,1	0,75-0,9	10	0,05	λ=0,9 мкм 0,6	1,00E-09	5,00E-14
2. фототриод-тор ФТ-1К	2,8	0,5-1,12	0,8-0,9	5	3	λ=0,9 мкм 24	8,00E-05	4,00E-13
3. фотодиод с охранным кольцом	1,5	0,2	0,4	10	0,2	λ=0,2 мкм 0,065 λ=0,9 мкм 0,5	1,00E-09	1,00E-13
4. NiSi-nSi-TiSi ₂	0,01	0,2-1	0,35-0,5	0,3-0,3	0,0001	λ=0,2 мкм 0,27 λ=0,4 мкм 0,35 λ=0,5 мкм 0,11 λ=0,9 мкм 0,06 λ=0,5 мкм 0,2	1,00E-11	1,00E-14
								1,00E-12

* экспериментальная данная

правленными барьерами Шоттки.

2. На базе созданной ранее установки рекристаллизации, разработана технология рекристаллизации тонких (≤1мкм) поликристаллических слоев кремния, осажденных на металл. Найден технологические режимы рекристаллизации: мощность лазера в непрерывном режиме P=20 Вт, длина волны падающего излучения λ=1,06мкм, диаметр пучка на пластине d=0,1мм, температура окружающей среды T_о=600°C, время облучения t_о=2,5·10⁻³с, скорость сканирования 4,5см/с. Экспериментально оцененные значения подвижности носителей заряда составили величину 555см²/В·с для электронов. Высота образованного в едином технологическом цикле тылового барьера TiSi₂-Si составила величину 0,6 эВ.
3. Разработана технология получения TiSi₂-n-Si-NiSi структур на базе существующей микроэлектронной промышленной технологии. Низкотемпературные процессы предложенного технологического цикла, а также конструкция и параметры предложенных структур, обеспечивают возможность их использования при создании ТМИС. Предложена экспериментальная методика исследования электрофизических и фотоэлектрических характеристик предложенных силицид-кремний-силицид структур.
4. Выведены: математическое выражение ВАХ для структур с двумя противоположно направленными потенциальными барьерами, базовая область которых высокоомная и целиком охвачена областями этих барьеров; математическое выражение для фототока предложенных структур в зависимости от параметров самой структуры и внешнего напряжения смещения.
5. Обнаружен эффект смены знака фототока в зависимости от длины волны падающего излучения, сопротивления исходного материала и от приложенного внешнего напряжения смещения; исследован весь комплекс фотоэлектрических свойств.
6. Экспериментально показано, что антиотражающие свойства двух силицидных контактов увеличивают эффективность поглощения падающего на образец из-

лучения, особенно в области длинных волн."

- 7. Оценено быстродействие образцов, которое составило величину $\approx 10^{-12}$ с. Получены высокие значения фоточувствительности для длинноволнового максимума $\lambda=0,5$ мкм $S_{\lambda}=0,2$ А/Вт и $S_{\lambda}=0,35$ А/Вт для коротковолнового максимума при $\lambda=0,35$ мкм, а также в собственной области при $\lambda=0,9$ мкм $S_{\lambda}=0,06$ А/Вт. Пороги чувствительности при $\lambda < 0,5$ мкм и $\lambda \sim 0,9$ мкм оказались равны соответственно 10^{-14} Вт Гц^{-1/2} и 10^{-12} Вт Гц^{-1/2}.
- 8. Предложена новая фотоприемная структура с высокими эксплуатационными параметрами, пригодными в области микроэлектроники.

Список публикаций по теме диссертации:

1. Khoudaverdian S., Grigorian G. "Elaboration of a Technology for preparing M-S-M Structures with the Recrystallized Layer on Semiconductor".-First Int. Conference on Application of Critical Technologies for the Needs Of Society, Yerevan, 1995.
2. Մակերևութային p-n-անցումով ֆոտոդիոդներ. Խուրավերոյան Ս.Խ., Գրիգորյան Գ.Է., Ղարիբջան Կ.Բ. (հայտ N (51) ՄԱՌՏ⁵ H01 ն 31 07), գյուտի նկարագրություն (11), 365 A2, հրատարակման թվ. 08.08.97. N1.
3. Худавердян С.Х., Григорян В.Э., Григорян Г.Э., Гарнвян К.Б. Структуры М-П-М с инверсией знака фототока.-Изв.НАН и ГИУ Армении. (сер.ТН), т. L, N2, 1997, с.147-151.
4. Բարակ վերաբյուրեղացված բազայով կիսահաղորդչային ֆոտոդիոդներ.- Վ.Վ.Գրիգորյան, Գ.Է.Գրիգորյան, Կ.Բ.Ղարիբջան. Ս.Խ. Խուրավերոյան կիսահաղորդչային Միկրոէլեկտրոնիկա. Առաջին ազգային գիտաժողովի նյութեր. Դիլիջան 22-23 մայիսի, Երևան, ԵՊՀ հրատ. 1997. 133-136 էջ.
5. Григорян Г.Э. Исследование эксплуатационных характеристик NiSi -n-Si- TiSi₂ структур/ГИУА, Ереван, 1998.-13с.- Деп. В АрмНИИНТИ, N84-Ар98 05.06.98, N 4, стр. 29.

15.05.2014

ԳՐԻԳՈՐՅԱՆ ԳՈՏԱՐ ԷՂԻԿԻ

"Վերաբյուրեղացված բազայով ֆոտոդիոդների կառուցվածքների մշակումը և հետազոտումը"

թեմայով ատենախոսության

Հ Ա Մ Ա Ա Ռ Տ Ա Գ Ի Ր

Մշակված է գոյություն ունեցող ստանդարտ տեխնոլոգիական հոսքագծերով ստացվող NiSi -n-Si- TiSi₂ կառուցվածքների տեխնոլոգիան: Որպես բազա ծառայում է լազերային վերաբյուրեղացմամբ ստացվող սիլիցիումի բարակ շերտը, որում նրկու կողմից հակառակ ուղված պտտնցիալ արգելքներով (TiSi₂ -n-Si և NiSi -n-Si) ապահովվում է արտաքին լարման ցանկացած բևեռականության դեպքում հանդիսակամ հոսանքների փոխազդեցությունը և կախված այդ բևեռականությունից մեկ կամ մյուս հոսանքի զերանկայությունը: Ուսումնասիրված են այդ կառուցվածքի էլեկտրաֆիզիկական և ֆոտոէլեկտրական հատկությունները, բացահայտված են նրկու հավաքիչ արգելքների տարածական լիցքերով շերտերի լայնությունների փոփոխման օրինաչափությունները կախված արտաքին կիրառված ջնդհանուր լարումից և բազայում լիցքակիրների խտությունից: Ստացված են համապատասխան մաթեմատիկական արտահայտություններ: Կառուցվածքները հետազոտվել են նաև էլեկտրամագնիսական ճառագայթներով ազդելիս կլանման սպեկտրի սնվական և կարծալիքային միջակայքերում: Բարձր օհմային բազայի (թունելային հոսանքների բացակայություն) և սիլիցիոնների առկայության դեպքում, նրբ բացակայում է մեկուսիչ բացակը, իսկ բազան զրավված է նրկու արգելքների տարածական լիցքերի շերտերով, դիոդային տեսության կիրառմամբ, ստացված է մթնային և լույսի ազդեցության պայմաններում վոլտ-ամպերային բնութագրի արտահայտությունը, որը հակառակ ուղղված սիլիցիոնային պտտնցիալ արգելքների որոշակի հարաբերակցության պայմաններում նկարագրում է սպեկտրալ բնութագրում առկա ֆոտոհոսանքի նշանափոխման երևույթը: Սպեկտրալ բնութագրում նկատելի է կարծալիքային մաթիմումի կախվածությունը կիրառված արտաքին լարումից հետևաբար առաջարկվող կառուցվածքը կարող է ծառայել որպես ֆոտոզայնության ղեկավարվող սպեկտրով ֆոտոդիոդների: Հետազոտված են սարքի արագազորության և ազմուկների հետ առնչվող խնդիրներ: Ցույց է տրված բարձր կարծալիքային ֆոտոզգայնության պայմաններում մեծ արագազորության և շեմային ֆոտոզգայնության առկայությունը:

Տպագրված է ՀՀ ԲՈՀ-ի պապովերով

Հանձնված է տպագրության 12.10.98 թ: Պատվեր 216: Տպաքանակ 60:

**Տպագրված է «Դավիթ» կոոպերատիվի տպարանում:
Երևան, Տերյան 72:**