

**НЕСТАЦИОНАРНЫЕ ЭЛЕКТРОННЫЕ ПРОЦЕССЫ В
p-n И МДП СТРУКТУРАХ**

**Э.А.ДЖАФАРОВА, З.А.ИСКЕНДЕР-ЗАДЕ*, Э.С.ТАПТЫГОВ,
Ш.А.АЛИХАНОВА, Н.А.ГАСАНОВА****

*Институт физики АН Азербайджана,
370143, Баку, пр.Г.Джавида 33
Азербайджанский Технический Университет
370073, Баку, пр.Джавида 25*
Азербайджанский Медицинский Университет
370022, Баку, ул.Бакиханова 23***

Данная статья представляет собой обзор работ, начатых под руководством академика Г.Б.Абдулаева, основоположника полупроводниковой электроники, неисчерпаемые идеи которого по сей день стимулируют развитие этого направления в Азербайджане.

Комплексом методик: вольтамперных, вольтфарадных характеристик, нестационарной емкостной спектроскопии, фотоемкости и фотопроводимости - выяснены механизмы эффектов переключения и памяти в МДП –структурах на основе кремния, возможность их практического использования в создании стабильных и управляемых переключателей и элементов памяти, установлены особенности энергетического спектра кремния и германия, легированных примесями переходных металлов (Ni,W,Ta,Ti).

Развитие микроэлектроники тесно связано с поиском наиболее перспективных материалов для чувствительных элементов с управляемыми параметрами,основанными на процессах инжекции,диффузии,дрейфа,генерации и рекомбинации неосновных носителей,теплого выброса или обратного захвата носителя на глубокий уровень,обуславливающих инерционные свойства полупроводниковых структур.На инерционные свойства структур значительное влияние оказывают примеси с глубокими уровнями (ГУ),особое место среди которых занимают переходные металлы (Mn,Fe,Co,Ni,W,Ti,Ta).

Развитие емкостных методов исследования открыло новые возможности в изучении свойств глуболежащих примесей с высокой чувствительностью и разрешающей способностью. Парамагнетизм этих центров дает возможность эффективно использовать метод ЭПР для исследования состояния примеси в матрице кремния.

В настоящее время недостаточно изучены: влияние ГУ на инерционные свойства полупроводниковых приборов; реактивные свойства структур с одним и несколькими переходами; влияние внешних воздействий на параметры ГУ в кремнии; не исследовано влияние фотоинжекции и инжекции из соседнего перехода на реактивные свойства.

До сих пор остается актуальной проблема создания твердотельных управляемых емкостных и индуктивных элементов; актуальна задача выяснения критериев возникновения и условий существования эффективных добротных емкостных и индуктивных элементов на основе полупроводников,управляемых напряжением, теплом, светом и др.факторами.

Очень важным для полупроводниковой электроники является поиск новых методов создания p-n перехода, не требующих энергоемких высокотемпературных

процессов диффузии,исключающих загрязняемость полупроводника в процессе получения структуры; разработка и исследование новых переключающих устройств на МДП структурах с целью создания технологически и конструктивно совместимых с кремниевыми интегральными схемами элементов памяти и переключателей. Развитие фотоэлектроники вызывает повышенный интерес к быстродействующим высокочувствительным фотоприемникам. В этом плане весьма перспективны фотоприемники на основе МДП структур с туннельным диэлектриком.

Барьерная и диффузионная емкость р-п структур. Емкость подвижных носителей заряда переходного слоя на основе кремния, германия и фосфида галлия [1,2]

Р-п структуры на основе n и p-Si с $\rho=0,04\div 60\text{Ом}\cdot\text{см}$ были изготовлены по диффузионно-сплавной и диффузионной технологии (для n-Si диффузантом служил алюминий,а для p-Si – фосфор и сурьма).Образцы на n-Si с $\rho =20\text{Ом}\cdot\text{см}$ имели толщину базовой области $d=(0,3\div 2,8)\text{мм}$. Эмиттерные и коллекторные переходы Si транзисторов типа n-p-n и Ge транзисторов типа p-n-p изготовлены диффузионным методом. Фосфид-галиевые структуры (светодиоды с красным и зеленым свечением. Были изготовлены методом жидкостной эпитаксии.

В фосфид-галлиевых р-п структурах,полученных методом жидкостной эпитаксии, распределение примеси в слое объемного заряда носит резкий характер ($\gamma=2$), для диффузионных р-п структур на основе n- и p-Si, имеющих линейное распределение примесей показано,что при низких частотах переменного сигнала ($\omega t \ll 1$) и в прямом направлении емкость обусловлена инжекцией и диффузией неосновных носителей в базовой области: $C_{\text{диф}} \approx (q^2/kT)SP_nL_n \exp(qU/kT)$, а при высоких частотах она обусловлена $C_{\text{пз}}=(q^2/kT)Sn_i \exp(qU/2kT)$ изменением объемного заряда свободных носителей в переходном слое – за период малого переменного сигнала дополнительно инжектированные свободные носители не успевают выйти за пределы переходного слоя и $C_{\text{пз}}$ преобладает над $C_{\text{диф}}$ (Рис.1) [2,3]. Впервые показано, что максимальное значение емкости подвижных носителей заряда обратно пропорционально частоте, в то время как $C_{\text{диф}} \sim \omega^{-1/2}$, последняя согласуется с теорией Шокли.

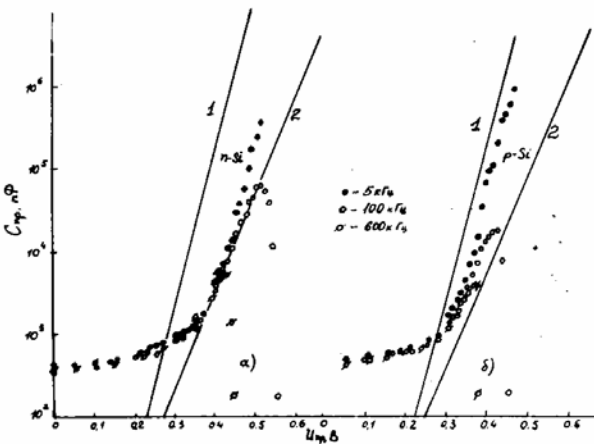


Рис.1.

Зависимость емкости от прямого смещения при $T=300\text{К}$ для р-п структур на основе n-(а) и p- кремния (б), (точки – экспериментальные данные, прямая 1- расчетная $C_{\text{диф}}$, прямая 2- $C_{\text{пз}}$).

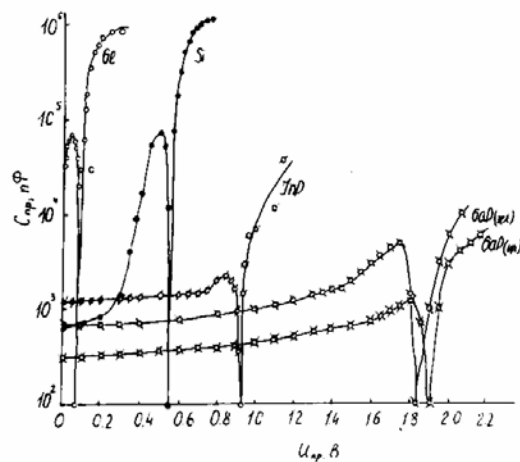


Рис.2.

Зависимость $C(U_{пр})$ для структур на основе различных полупроводниковых материалов при 300К и 100кГц.

В фосфид-галлиевых p-n структурах даже при низких частотах $C_{пз}$ преобладает над $C_{диф}$, что обусловлено как большой шириной запрещенной зоны, так и меньшей подвижностью электронов, чем в кремнии [4].

Индуктивные свойства p-n структур

В прямосмещенных p-n переходах обнаружена инверсия реактивного сопротивления, переход емкостной реактивности в индуктивную. Установлено, что инверсия характера реактивности наблюдается на всех p-n структурах (Рис.2) и с увеличением ширины запрещенной зоны полупроводника $U_{инв}$ линейно возрастает [5,6]. Показано, что в диффузионных p-n структурах $U_{инв}$ уменьшается с ростом частоты переменного сигнала $U_{инв}=U^* \cdot \ln \omega$, что обусловлено линейным распределением примеси в области p-n перехода и уменьшением глубины проникновения неосновных носителей, инжектированных переменным сигналом, с ростом частоты [6]. В области интенсивной электролюминесценции светодиод обладает реактивностью индуктивного характера [4].

Влияние фотоинжекции и инжекции на реактивные свойства p-n структур

Показано, что при больших уровнях фотоинжекции происходит инверсия емкости p-n структур в индуктивность без приложения постоянного смещения, что подтверждает инжекционный механизм возникновения индуктивности и дает возможность светопреобразования величиной и знаком емкости. Эмиттерный ток увеличивает диффузионную емкость коллекторного перехода транзисторов. С ростом эмиттерного тока $U_{инв}$ коллекторного перехода уменьшается [7].

Влияние центров с глубокими уровнями на свойства кремниевых p-n структур

Измерением времени жизни неосновных носителей показано, что рекомбинация неравновесных носителей в n-базе диффузионных p-n структур с примесью W и Ta происходит на акцепторных центрах с уровнями $E_v + 0,45 \text{ эВ}$ (для W) и $E_v + 0,41 \text{ эВ}$ (для Ta). При $T=300\text{K}$ $\sigma_p/\sigma_n \sim 5$. С увеличением температуры эффективное сечение захвата дырки уменьшается по закону: $\sigma_p \sim T^{-n}$, где $n=3 \div 5$. Для Si p-n структур с примесью Ti рекомбинация происходит через два уровня: при $T < 450\text{K}$ через уровень $\Delta E_{t1}=0,12 \pm 0,02 \text{ эВ}$, а в высокотемпературной области – через $\Delta E_{t2}=0,36 \pm 0,02 \text{ эВ}$. Рекомбинация неравновесных носителей в n-Si<Ni> осуществляется на глубоких центрах с $E_v + 0,22 \text{ эВ}$, имеющих акцепторную природу, $\sigma_n \sim \sigma_p$ [8,9].

Определение основных параметров глубоких уровней никеля в кремнии и германии методом нестационарной емкостной спектроскопии (НЕСГУ)

Используя комплекс методик: нестационарной емкостной спектроскопии, фотоемкости и фотопроводимости показано, что диффузионное легирование Si никелем приводит к образованию трех глубоких уровней акцепторного типа с энергиями ионизации $E_c - 0,20 \text{ эВ}$ (уровень А), $E_c - 41 \text{ эВ}$ (уровень В) и $E_v + 0,18 \text{ эВ}$ (уровень С), (Рис.3а,б); определены эффективные сечения захвата основных носителей на эти центры: $\sigma_n=3,20 \cdot 10^{-16}$; $1,10 \cdot 10^{-16}$ и $\sigma_p=1,01 \cdot 10^{-13} \text{ см}^2$ [10].

Нами обнаружены два ГУ уровня в Ge (как n-, так и p-типа) с энергиями $E_c - (0,3 \pm 0,02) \text{ эВ}$ и $E_v + (0,23 \pm 0,02) \text{ эВ}$ с $\sigma_n=3,5 \cdot 10^{-15} \text{ см}^2$ и $\sigma_p=3,7 \cdot 10^{-13} \text{ см}^2$. Сопоставление параметров ГУ, а также фотоэлектрических свойств Ge<Ni> с соответствующими данными для Si<Ni> указывает на сходство в поведении никеля в кристаллах, имеющих структуру типа алмаза (модель тетраэдральных связей) [11].

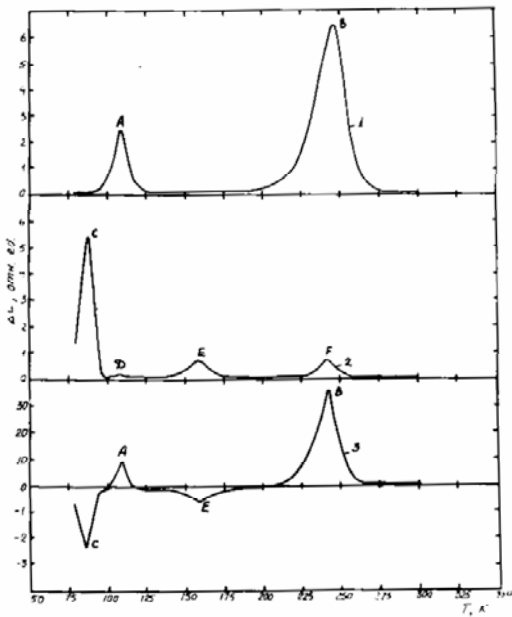


Рис 3а.

Спектры НЕСГУ Si<Ni>, 1-для структур на основе n-Si<Ni>; 2-для структур на основе p-Si<Ni>; 3-для структуры на n-Si<Ni> (измерения в режиме инжекции).

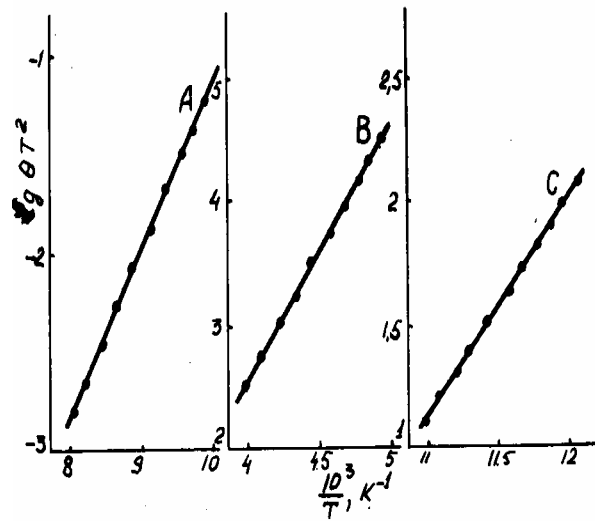


Рис 3б.

Температурная зависимость постоянной времени перезарядки для глубоких уровней А, В и С.

Исследование центров захвата в слое объемного заряда эпитаксиально – планарных диффузионных p-n структур методом ТСТ

Пики ТСТ наблюдались только в образцах с мягкими обратными ВАХ (Рис.4). Показано, что зарядка центров захвата при прямом смещении более эффективна, чем при обратном.

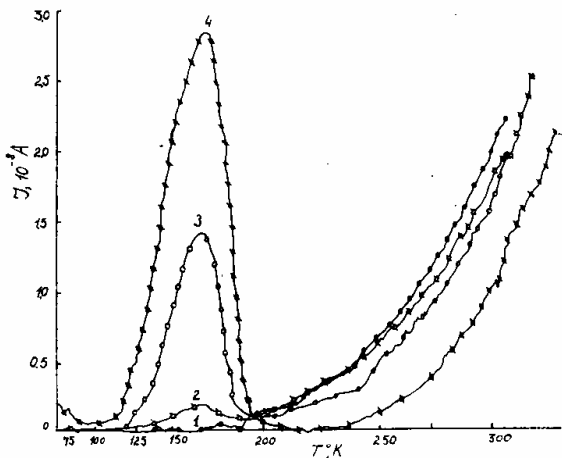


Рис 4.

Кривые ТСТ в зависимости от условий зарядки ловушек. Для всех кривых $U_{обр}=1В$ и $b=0,14градс^{-1}$. Для кривой 1 $J_{зар}=0$. Кривая 2 записана после зарядки ловушек обратным смещением $U_{обр}=6В$ ($J_{зар}=2,5 \cdot 10^{-8}А$), а кривые 3 и 4 – после зарядки ловушек прямым смещением $U_{пр}=0,46В$ и $0,59В$ ($J_{зар}=1,8 \cdot 10^{-9}$ и $2,5 \cdot 10^{-8}А$ соответственно).

Влияние низкотемпературного отжига на поведение атомов никеля в кремнии

Установлено, что термообработка при $T \leq 200^{\circ}C$ к заметным изменениям концентрации и параметров ГУ не приводит. Однако, начиная с $T \geq 300^{\circ}C$ уменьшается концентрация всех ГУ в зависимости от времени и температуры термообработки (т.е.наблюдается отжиг всех трех ГУ), но при этом параметры ГУ не изменяются и новые уровни не появляются. На основании сопоставления

кинетики отжига ГУ никеля в кремнии с моделью Пеннинга можно заключить, что глубокие уровни $E_c - 0,41\text{эВ}$ и $E_v + 0,18\text{эВ}$ связаны с атомами никеля в узлах решетки кремния, а уровень $E_c - 0,20\text{эВ}$ связан со структурным дефектом, образующимся в процессе легирования кремния никелем.

Воздействие проникающего γ -излучения на свойства глубоких уровней никеля в кремнии [12,13]

Облучение γ -квантами дозой $2,58 \cdot 10^{12} \text{кв.см}^{-2} \cdot \text{с}^{-1}$ заметного влияния на параметры и концентрацию глубоких уровней А и В не оказывает (n-Si с концентрацией кислорода $N_o = 2,2 \cdot 10^{17} \text{см}^{-3}$) и после облучения появляются новые глубокие уровни Д ($E_c - 0,17\text{эВ}$), Е ($E_c - 0,23\text{эВ}$), F ($E_c - 0,30\text{эВ}$) и К ($E_c - 0,44\text{эВ}$). Эти уровни по своим параметрам близки к комплексу вакансии – кислород (А – центр) – глубокий уровень Д, комплексу вакансии – фосфор (Е – центр) – глубокий уровень К. Глубокие уровни Е и F принадлежат различным дивакансионным комплексам в n – Si .

Исследование радиационного дефектообразования в n-Si, легированном РЗЭ (Dy, Er) и Ge [14]

Показано отсутствие какого-либо различия в скорости образования РД в легированных Dy, Er, Ge и контрольных образцах, что объясняется малостью концентрации введенной примеси: 10^{14}см^{-3} (Dy, Er) и 10^{16}см^{-3} (Ge).

Парамагнитные центры никеля в кремнии

Нами обнаружен новый спектр ЭПР в n-Si<Ni> с исходной концентрацией фосфора более 10^{15}см^{-3} (Рис.5).

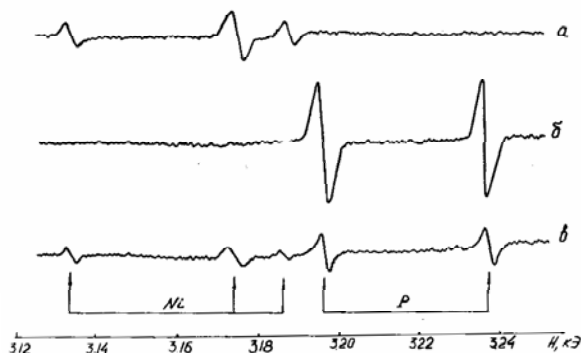


Рис 5.

Спектр ЭПР центров Ni в Si при ориентации магнитного поля $H \parallel [110]$ и $T = 20\text{К}$; а – без освещения; в - через 15 минут после выключения света.

Из зависимости амплитуды сигнала ЭПР от исходной концентрации фосфора в кремнии, а также экспериментов с оптической перезарядкой, можно заключить, что наблюдаемый центр имеет акцепторную природу. Установлено, что угловая зависимость положения основных линий в спектре ЭПР центра никеля описывается Гамильтонианом с эффективным спином 1/2. Симметрия g-тензора является ромбической. С помощью анализа линий сверхтонкой структуры, обусловленной сверхтонким взаимодействием неспаренного электрона с ближайшими ядрами кремния ^{29}Si установлено, что дефект содержит два эквивалентных ядра, а неспаренный электрон центра взаимодействует с двумя ядрами кремния. Эти данные, а также симметрия g- тензора нового парамагнитного центра Ni в Si находятся в хорошем согласии с теоретической моделью, предложенной Уоткинсом для центров Ni^{2+} , Cu^0 и их 4d и 5d аналогов в Si и Ge. Из экспериментов ЭПР с оптической подсветкой монохроматическим светом установлено, что наблюдаемый спектр ЭПР и зависимость амплитуды его от $h\nu$

падающего света обусловлен переходами центра никеля из состояния Ni^{2+} в состояние Ni^{+} и связан с различной степенью заполнения акцепторного уровня никеля $E_c - 0,41 \text{ эВ}$, обнаруженного в образцах с помощью НЕСГУ.

Переходные процессы в Al – Si – SiO₂ – М структурах

Методом фотолитографии получены структуры Al–SiO₂–Si–М с диаметром дискретного контакта $60 \text{ мкм} \div 2 \text{ мм}$ и прямоугольной формы размером $(1 \times 2) \text{ мм}^2$. Исследования ВАХ структур на основе p–Si, проведенных в интервале температур $77 \div 470 \text{ К}$ показали, что в исходном состоянии до определенного значения напряжения ($U_{\text{пор}}$) зависимость тока от напряжения имеет вид: $J \sim U^{3/2}$, для образцов, в которых окисел получен термическим путем и $J \sim U^3$, для которых окисел получен путем пиролиза [15]. Дифференциальное сопротивление структур в закрытом состоянии изменяется в пределах $5 \cdot 10^{13} \div 10^{11}$ и $10^{12} \div 10^9 \text{ Ом}$, соответственно, для "составного" и пиролитического окислов. Начиная с некоторого $U_{\text{кр}}$, величина тока скачком возрастает от 10^{-9} до 10^{-3} А , т.е. структура переходит в состояние высокой проводимости, где может находиться произвольно долго. Для структур на основе p–Si зависимость $J(U)$ в состоянии высокой проводимости симметрична и линейна, а сопротивление структуры почти не меняется в зависимости от температуры и изменяется в пределах $140 \text{ Ом} \div 2 \text{ кОм}$ при разном числе переключений.

Относительно высокий потенциальный барьер на Si–SiO₂ и каналный механизм проводимости, вероятно, обуславливает наблюдаемую нами впервые стабильность от температуры ($77 \div 460 \text{ К}$) напряжения включения МДП структур на n– и p–Si и сопротивления структуры на p–Si в состоянии высокой проводимости [16, 17].

Можно предположить, что линейность ВАХ есть следствие переноса материала электрода (Al) через SiO₂ под действием сильного электрического поля и тепла, локально выделяемого при переключении в канал и, вероятно, в подложку в области, прилегающей к каналу высокой проводимости.

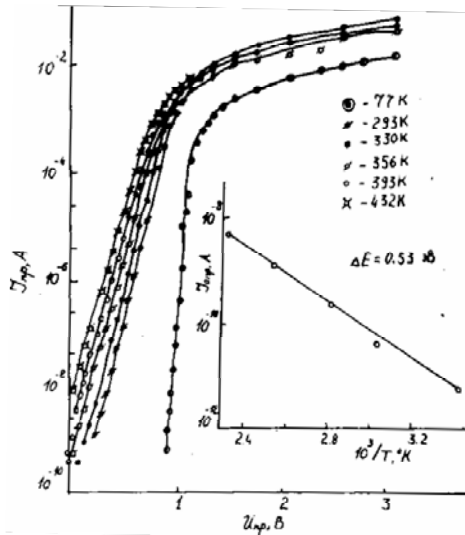
Исследование переходных характеристик структур Al–SiO₂–Si–М позволило заключить, что наблюдаемые процессы задержки и переключения в исследованных структурах обусловлены электронным механизмом [16,17].

Обнаружено, что при воздействии на структуру одиночными импульсами порогового напряжения с конца импульса возникают осцилляции напряжения и тока. С увеличением напряжения на $\Delta U_{\text{пор}} \ll 5 \text{ В}$ возрастает число колебаний почти синусоидальной формы в случае термического окисла ($d_{\text{ок}} = 0,3 \text{ мкм}$) и они постепенно заполняют весь импульс. Эпюры тока через эти структуры показывают наличие почти гармонических колебаний.

Переключение структуры в состояние высокой проводимости и электродиффузия Al в кремний осуществляется на периодическом, импульсном и постоянном напряжениях, когда локальная температура достаточна для диффузии Al в n–Si. В открытом состоянии прибор может оставаться произвольно долго, переключение его снова в высокоомное состояние производится одиночным импульсом тока любой полярности.

В прямом направлении зависимость $J(U)$ носит экспоненциальный характер (при малых уровнях инжекции) $J_{\text{пр}} = J_0 \exp(qU_{\text{пр}}/\beta kT)$, где $J_0 = 7 \cdot 10^{-12} \text{ А}$ и $\beta = 1,9$ ($T = 300 \text{ К}$) (Рис.6). При средних и больших $U_{\text{пр}}$ наблюдается ослабление роста тока с напряжением до степенной зависимости $J_{\text{пр}} \sim U^n$, где $n = (1,5 \div 3)$, т.е. ток ограничивается модулированным сопротивлением растекания базы. Температурная зависимость экстраполированного к нулю напряжений прямого тока дает энергию активации $\Delta E = 0,53 \text{ эВ}$, равную полуширине запрещенной зоны кремния. Таким

образом, при малых уровнях инжекции ток через переход обусловлен рекомбинацией носителей в области объемного заряда. В обратном направлении $J_{обр} \sim U_{обр}^m$, где $m=1,0 \div 0,5$ при $U_{обр}=(0,1 \div 0,5)V$ и $7,0 \div 2,0$ ($U_{обр}=1,5 \div 6V$) в интервале $T=293 \div 433K$; $J_{обр}$ по абсолютной величине значительно больше генерационного тока. Показано, что пробивное напряжение p-n структур $U_{проб} \leq 15V$ ($T=300K$) возрастает с увеличением $\rho_{исх}$, $U_{проб}$ растет с температурой. Для образцов



на основе низкоомного кремния ($U_{пр} \leq 7V$) наблюдается уменьшение или отсутствие зависимости $U_{проб}(T)$, что свидетельствует о росте концентрации подвижных носителей, в основном, за счет туннельного эффекта.

Рис. 6.

Прямая ветвь ВАХ Al-SiO₂-nSi-M структур в открытом состоянии и температурная зависимость экстраполированного тока $J_{опр}(1/T)$.

Исследование p-n переходов, полученных электродиффузией Al через пленку SiO₂ в n-Si методом растровой электронной микроскопии

Исследованы p-n переходы микронных размеров, возникающих при электродиффузии Al через тонкий слой термически выращенного SiO₂ в n-Si [17, 18] на растровом электронном микроскопе JSM-5. В основу методики положено изучение образцов одновременно в двух режимах работы РЭМ – во вторичных электронах (ВЭЭ) и наведенном токе (НТ). Первый режим позволяет наблюдать объемно воспринимаемую картину нарушений в слое алюминия, окисла и кремния. Во втором режиме выявляется СОЗ p-n перехода, с прилегающей областью порядка нескольких длин диффузии неосновных носителей: соответствующий контраст появляется в результате разделения p-n переходом генерированных электронным зондом электронно – дырочных пар.

Канал в структуре представляет собой кратер почти круглой формы с углублением в центре. Этот кратер диаметром 2÷3мкм образовался в результате выделения энергии при приложении порогового электрического поля. Свидетельством электродиффузии алюминия в n-Si и образования области p-типа проводимости непосредственно над каналом является изображение локальной области канала в режиме наведенного тока при увеличении РЭМ в 3·10³ раз. Размер яркой области, в которой наведенный ток большой, значительно превосходит размер канала p-области, наблюдаемого в режиме ВЭЭ. Распределение наведенного тока в области канала носит экспоненциальный характер. Из наклона $\Delta \ln J_{НТ}/dl$ определена диффузионная длина дырок в n-области, которая составляет $6 \pm 0,2$ мкм, исходя из этого оценено время жизни неравновесных дырок $\tau_p \sim 28$ нс.

Электронно-микроскопические исследования показали [18], что образуется p-область полусферической формы диаметром 2÷6мкм, простирающаяся на глубину не менее 10мкм, что подтверждает наличие электродиффузии Al в n-Si. Используя оценки диаметра канала и диффузионной длины неравновесных носителей, вычислен экспоненциальный множитель рекомбинационного тока при

прямом смещении $J_{ог} = qS(W/\tau)n_i$. При $D_k \sim 6 \text{ мкм}$, $\tau = 2,8 \cdot 10^{-8} \text{ с}$, $W \sim 10^{-5} \text{ см}$ получаем $4 \cdot 10^{-13} \text{ А}$, что совпадает с данными [17] и подтверждает наблюдаемое отсутствие зависимости $J_{пр}$ структур от площади контакта.

Релаксация неравновесного эффекта поля в $\text{In}_2\text{O}_3\text{-SiO}_2\text{-Si-SiO}_2\text{-Al}$ структуре в режиме неравновесного обеднения

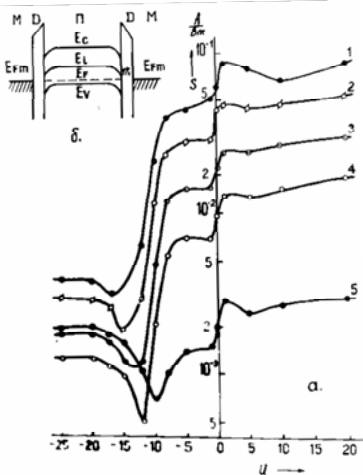
При приложении к МДПДМ структуре импульса напряжения вследствие протекания переходных процессов в заданной области обеднения происходит интенсивная генерация носителей, которая доминирует над рекомбинацией и под действием внешнего приложенного поля генерируемые носители разносятся в приэлектродные области. Со временем толщина обедненной области уменьшается; все это сопровождается протеканием тока до тех пор, пока в объеме полупроводника внутренние и внешние поля не компенсируются.

Реактивные свойства $\text{In}_2\text{O}_3\text{-SiO}_2\text{-Si-SiO}_2\text{-Al}$ структур при наличии неравновесного обеднения

Переходные процессы в МДПДМ-структурах в режиме неравновесного обеднения в основном характеризуются зарядкой и разрядкой емкости ОПЗ. Показано, что ход зависимости $C(V)$ для данных структур подобен низкочастотным $C(V)$ характеристикам МДП структур на основе p-Si, однако значение емкости в области насыщения не достигает емкости диэлектрических слоев при высокочастотных измерениях. Зависимость предельных значений емкости при обеих полярностях напряжения от частоты тестового сигнала свидетельствует о том, что оба эти значения характеризуются поверхностными емкостями на границе раздела $\text{SiO}_2\text{-Si}$ и Si-SiO_2 . При частоте 1кГц зависимость $C(V)$ имеет четко выраженный минимум при $V = -12,5 \text{ В}$, т.е. кривая смещается в сторону отрицательных напряжений на $-12,5 \text{ В}$ относительно идеального случая, что связано с наличием положительно встроенного заряда в слоях окисла ($\sigma_{ок} = C_{ок} V_{пз} / A = 1,1 \cdot 10^{-7} \text{ Кл/см}^2$, $C_{ок}$ - емкость окисла, $V_{пз}$ - напряжение плоских зон, A - площадь структуры). Т.о. $\text{In}_2\text{O}_3\text{-SiO}_2\text{-Si-SiO}_2\text{-Al}$ -структуры характеризуются не только поверхностно-барьерными емкостями $\text{In}_2\text{O}_3\text{-SiO}_2\text{-Si}$ и $\text{Si-SiO}_2\text{-Al}$ структур, но и дополнительной емкостью, обусловленной изменением характера распределения потенциалов и электрических полей на границах разделов.

Особенности проводимости структур металл-диэлектрик-полупроводник при освещении

Структура металл-диэлектрик-полупроводник представляет большой



интерес в связи с высокой чувствительностью поверхностного потенциала полупроводника в области обеднения (или слабой инверсии) к уровню фотовозбуждения. Исследовалась ВАХ, спектральная характеристика, кинетика фототока $\text{In}_2\text{O}_3\text{-SiO}_2\text{-Si-SiO}_2\text{-Al}$ структур при различных напряжениях [19].

Рис.7.

Зависимость фоточувствительности МДПДМ структур от постоянного напряжения при различных длинах волн света (1 – 0,55; 2 – 0,66; 3 – 0,82; 4 – 0,93; 5 – 1,03мкм) (а) и энергетическая зонная диаграмма при нулевом смещении (б) .

Структура освещалась со стороны In_2O_3 светом, модулированным с частотой 300 Гц. ВАХ исследуемых структур линейны и токи через структуры при $U \sim$ несколько вольт составляют наноамперы. При приложении к верхнему In_2O_3 электроду отрицательного напряжения фототок падает до уровня шума при $U_p=12\text{В}$, меняет знак и возрастает по абсолютной величине, стремясь к насыщению. Обнаружено, что фоточувствительность МДПДМ-структур управляется приложенным напряжением (Рис.7, при 1 - $\lambda=0,55$; 2 - 0,66; 3 - 0,82; 4 - 0,93; 5 - 1,03 мкм). Возможность управления фоточувствительностью МДПДМ-структуры в основном обусловлена особенностью энергетических зон дырочного полупроводника в приповерхностном слое в МДПДМ- структурах (Рис.7). С изменением напряжения фоточувствительность исследуемых структур изменяется от $2 \cdot 10^{-3}$ до $1 \cdot 10^{-1} \text{А/Вт}$. Обнаружительная способность структур при $\lambda=0,2 \div 0,494 \text{ мкм}$, полосе частот $\Delta f = 30 \text{ Гц}$, составляет $D^* \sim 3 \cdot 10^{10} \text{ см} \cdot \text{Гц}^{1/2} \cdot \text{Вт}$.

Способ определения параметров полупроводникового диода [20]

таких как температура p-n перехода, концентрация основных носителей в базовой области, распределение потенциала вблизи p-n перехода и диффузионная разность потенциалов линейных переходов и изменение ее с температурой основан на изучении инверсии емкостной реактивности в индуктивную.

Способ изготовления полупроводникового переключателя [21]

со структурой $\text{Al} - \text{SiO}_2 - n\text{Si} - \text{Al}$, содержащей активную область $\text{Si} - \text{SiO}_2$ и контакты. Слой SiO_2 толщиной $d_{\text{ox}}=(0,1 \div 0,8) \text{ мкм}$ наращивается термическим окислением при $T=1150^\circ\text{C}$ на n-Si с $\rho=0,001 \div 20 \text{ Ом} \cdot \text{см}$. Верхний контакт изготавливается с использованием фотолитографии $\Phi=60 \text{ мкм} \div 2 \text{ мм}$ методом напыления в вакууме. Нижний контакт (сплошной) является невыпрямляющим и тоже изготавливается методом напыления.

С целью создания p-n перехода в качестве контакта затвора выбирается алюминий. Между контактами создается электрическое поле E с положительным полюсом, приложенным к Al электроду, нанесенному на SiO_2 и амплитудой, зависящей от толщины окисла - $(50 \div 170) \text{ В}$. Под действием приложенного поля происходит переключение структуры из исходного закрытого состояния с $R_d \sim 10^9 \text{ Ом}$ в состояние высокой проводимости ($R_d \sim 10^2 \div 10^3 \text{ Ом}$) с диодной характеристикой $J=[J_0 \exp(qU/\beta kT) - 1]$ с коэффициентом выпрямления $K \sim 10^6$ при $U=1 \text{ В}$.

Программируемый запоминающий элемент [22]

образуется под контактом затвора в процессе одной технологической операции - переноса типоменяющей примеси при $E_{\text{кр}}$ из контакта затвора через каналы в диэлектрике в исходную подложку (n-Si). Наличие диодной характеристики во включенном состоянии обусловлено возникновением при формовке локальной p-области в n-типа подложке под каналом затвора и слоем диэлектрика. Т.о. эквивалентная схема рассмотренной структуры после формовки соответствует следующей системе $\text{Al-SiO}_2 - p\text{Si} - n\text{Si} - \text{M}$, т.е. последовательно соединенным электронному ключу и диоду с p-n переходом. В предпочтительном варианте выполнения устройства с целью уменьшения длительности и амплитуды импульса восстановления высокого импеданса прибор выполнен на подложке с $\rho=0,001 \div 0,05 \text{ Ом} \cdot \text{см}$. Время восстановления высокого импеданса $t < 0,5 \text{ мкс}$, а амплитуда - 50В.

Разработка диодных матриц с идентичными параметрами для аналоговых
вычислительных машин

Даны рекомендации для получения диодов с идентичными прямыми падениями напряжения в матрице :

1) для предотвращения перегрева матрицы протекающим током необходимо расположить на теплорассеивающую подложку и тщательно термостатировать сам образец (с точностью $\pm 0,5^\circ\text{C}$) с тем, чтобы внутренний разогрев р-п перехода и базы диодов мог быть компенсирован автоматическим охлаждением окружающей среды и более усиленным отводом тепла от матрицы, при этом величина коэффициента влияния температуры будет порядка 1мВ ;

2) Si пластины для создания ДМ должны иметь разброс концентрации основной примеси из-за микронеоднородностей не хуже $\pm 10\%$, тогда $K_N \sim 1\text{мВ}$;

3) необходимо особое внимание уделить точности совмещения шаблонов в процессе фотолитографии (Δr_A не хуже $1,5\text{мкм}$), тогда величина $K_{\text{конг}}$ будет $\leq 1,25\text{мВ}$. Повышение точности фотолитографического процесса с величины $\pm 1,5\text{мкм}$ до $0,5\text{мкм}$ позволит снизить коэффициент влияния диаметра окна под диффузию с величины $1,48\text{мВ}$ до величины $0,5\text{мВ}$, а коэффициент влияния сопротивления растекания базы при этом уменьшится с $0,24$ до $0,08\text{мВ}$. Повышение точности установления температуры, отбора пластин и фотолитографического процесса позволит уменьшить $\Delta U_{\text{пр}}$ до 1мВ , а температурный коэффициент до 4мкВ/град .

Способ изготовления диодных матриц на основе Al-SiO₂-nSi-M [23]

включает формирование слоя диэлектрика толщиной $(0,4 \div 0,6)\text{мкм}$ на кремниевой пластине n-типа с $\rho = (0,01 \div 0,1)\text{Ом}\cdot\text{см}$, нанесение на него Al дискретных электродов диаметром $25 \div 40\text{мкм}$, нанесение на противоположную сторону пластины общего контакта и создание р-п переходов обработкой электрическим полем напряженностью $E = (4 \div 6) \cdot 10^6\text{В/см}$ в течение $5 \div 10\text{мкс}$. С целью уменьшения контролируемой области образования металлического канала в предложенной нами конструкции ДМ предварительно задается локальная область образования канала SiO₂ под затвором.

В изготовленном таким способом данных матрицах из 6 диодов максимальный разброс величины прямого падения напряжения $U_{\text{пр max}} = 24\text{мВ}$ (при $J_{\text{пр}} = 1\text{мА}$) при среднем разбросе $U_{\text{пр ср}} = 5\text{мВ}$. Напряжение токовой отсечки для всех диодов в матрице одинаково. Оно уменьшается с ростом температуры ($U_{\text{отс}} = 1,16; 0,85$ и $0,74\text{В}$), соответственно, при $77, 300$ и 478К . Коэффициент в показателе экспоненты в выражении $J_{\text{пр}} = J_0 \exp(qU/\beta kT)$ (описывающей закон изменения ВАХ элементов матрицы) $\beta = 2$ для всех диодов в матрице.

1. Г.А.Ахундов, Э.А.Джафарова, З.А.Искендер-заде, *Изв.АН Азерб.ССР, сер.ФТМН*, №5(1963) 95.
2. Г.Б.Абдуллаев, З.А.Искендер-заде, Э.А.Джафарова, *Изв.АН Азерб.ССР, сер.ФТМН* №3 (1964) 81.
3. Г.Б.Абдуллаев, З.А.Искендер-заде, Э.А.Джафарова, *Радиотехника и электроника*, 10 (1965) 776.
4. Г.Б.Абдуллаев, З.А.Искендер-заде, Ш.А.Алиханова, Э.А.Джафарова, М.Р.Ахундов, *ФТП*, 6 (1972) 2150.
5. G.V.Abdullaev, Z.A.Iskender-zade, E.A.Jafarova, *Phis.Letters*, 24A (1967) 5.
6. G.V.Abdullaev, E.A.Jafarova. Z.A.Iskender-zade, *Solid State Electronics*, 11 (1968) 23.
7. Г.Б.Абдуллаев, З.А.Искендер-заде, Э.А.Джафарова, М.Р.Ахундов, *Изв.АН Азерб.ССР, сер.ФТМН* №2 (1972) 144.

8. Г.Б.Абдуллаев, В.Е.Челноков, З.А.Искендер-заде, Э.А.Джафарова, *Радиотехника и электроника*, **11** (1966) 1151.
9. G.B.Abdullaev, Z.A.Iskender-zade, E.A.Jafarova, *Phys.Stat.Sol.*, **21** (1967) 423.
10. А.А.Лебедев, Э.А.Джафарова, Э.С.Таптыгов, *ДАН Азерб.ССР*, **43** №7 (1987) 34.
11. Э.А.Джафарова, *Изв.АН Азерб.,сер.ФТМН*,**20** №5 (2000) 22.
12. Э.А.Джафарова, Э.С.Таптыгов, Ш.А.Алиханова, *Изв. АН Азерб., сер.ФТМН*, **22** №5 (2002) 104.
13. Э.А.Джафарова, Э.С.Таптыгов, А.А.Лебедев, *Препринт №281 ИФАН Азерб.ССР, Баку* (1988).
14. Э.А.Джафарова, *Fizika*, **7** №1 (2001) 8.
15. З.А.Искендер-заде, М.Р.Ахундов, Э.А.Джафарова, С.Н.Рагимов, *ДАН Азерб.ССР*, **32** (1976) 15.
16. Г.Б.Абдуллаев, З.А.Искендер-заде, М.Р.Ахундов, Э.А.Джафарова, С.Н.Рагимов, *Микроэлектроника*, **6** (1977) 462.
17. З.А.Искендер-заде, Э.А.Джафарова, М.Р.Ахундов, А.Г.Абдуллаев, *Изв.АН Азерб.ССР, сер.ФТМН*, **4** (1978) 114.
18. Z.A.Iskender-zade, E.A.Jafarova, A.G.Abdullayev, *Solid State Communications*, **49** (1984) 273.
19. А.З.Бадалов, А.З.Искендер-заде, Э.А.Джафарова, *ЖТФ*, **54** (1984) 645.
20. Г.Б.Абдуллаев, З.А.Искендер-заде, Э.А.Джафарова, М.Р.Ахундов, Ш.А.Алиханова, *Авторское свидетельство СССР № 343231* (1972) .
21. .Г.Б.Абдуллаев, З.А.Искендерзаде, М.Р.Ахундов, Э.А.Джафарова, С.Н.Рагимов, *Авторское свидетельство СССР, № 587807* (1977).
22. Г.Б.Абдуллаев, З.А.Искендер-заде, Э.А.Джафарова, М.Р.Ахундов, С.Н.Рагимов, *Авторское свидетельство СССР, № 768335*(1980).
23. Г.Б.Абдуллаев, З.А.Искендерзаде, А.Г.Абдуллаев, Э.А.Джафарова, М.Р.Ахундов, С.Н.Рагимов, *Авторское свидетельство СССР № 760835*(1980).

p-n VƏ METAL - DIELEKTRİK- YARIMKEÇİRİSİ / MDY/ STRUKTURLARDA QEYRİ-STASİONAR ELEKTRON PROSESLƏRİ

E.Ə. SƏFƏROVA, Z.Ə.İSKƏNDƏR-ZADƏ, E.S.TAPTYQOV, Ş.Ə.ƏLİXANOVA, N.A.HƏSƏNOVA

Si əsasında hazırlanmış MDY strukturlarda kompleks metodlardan istifadə edərək (volt-ampere, volt-farad, qeyri-stasionar tutum spektroskopiyası, foto-tutum və foto-kesiricilik) aşırma və yaddaş effektlərinin mexanizmi öyrənilmişdir. Bunun əsasında stabil və idarə edilə bilən yaddaş elementlərinin praktik çəhətdən istifadə olunma imkanları araşdırılmışdır. Kesid metalları ilə aşqarlanmış (Ni, W, Ta, Ti) germanium və silisiumun energetik spektrinin xüsusiyyətləri müəyyən edilmişdir.

NON-STATIONARY ELECTRONIC PROCESSES IN p-n AND MOS STRUCTURES

E.A.JAFAROVA, Z.A.ISKENDER-ZADE, E.S.TAPTYQOV, Sh.A.ALIKHANOVA, N.A.QASANOVA

Complex of techniques: volt-ampere, volt-capacity characteristics, non-stationary capacitor spectroscopy, photo capacities and photoconductivity, are found out mechanisms of effects of switching and memory in MOS structures on the basis of silicon, an opportunity of their practical use in creation of stable and controlled switches and elements of memory, features of a power spectrum of Si and Ge, alloyed by impurity of transitive metals (Ni, W, Ta, Ti) are established.

Редактор:С.Мехтиева