

К. ф.-м. н. Э. А. ДЖАФАРОВА

Азербайджан, г. Баку, Институт физики  
E-mail: delm@physics.ab.az

Дата поступления в редакцию  
30.05 2006 г.

Оппонент д. ф.-м. н. А. А. ЕВТУХ  
(ИФП им. В. Е. Лашкарёва, г. Киев)

## НЕСТАЦИОНАРНЫЕ ЭЛЕКТРОННЫЕ ПРОЦЕССЫ В БАРЬЕРНЫХ СТРУКТУРАХ И ПРИБОРЫ НА ИХ ОСНОВЕ

*Предложены способы изготовления полупроводникового переключателя, ячейки памяти и диодной матрицы с идентичными параметрами (по  $U_{np}$ ) на основе Al-SiO<sub>2</sub>-Si-M-структуры.*

Известно, что получение полупроводников с заданными свойствами достигается введением в полупроводник специально выбранной примеси в нужной концентрации. Особое место в формировании свойств полупроводников занимают примеси с глубокими уровнями (ГУ) в запрещенной зоне. Легирование примесями с ГУ существенно изменяет свойства полупроводника, расширяет сферу применения существующих приборов и позволяет создавать принципиально новые приборы. Поэтому исследование нестационарных электронных процессов в барьерных структурах, изготовленных на основе различных полупроводников с глубокими примесями, является одним из основных направлений современной микроэлектроники.

В настоящей работе исследуются барьерные структуры, полученные предварительной диффузией бора в *n*-Si для получения *p-n*-перехода и дальнейшей диффузии примесей переходных металлов (Ni, Ti, Ta и W) в готовые переходы, а также созданием барьера Шоттки на *n*-Si и *p*-Si, предварительно легированных примесями с глубокими уровнями.

Исследования температурной зависимости времени жизни неосновных носителей (метод переходных характеристик восстановления обратного сопротивления *p-n*-перехода) с учетом изменения плотности состояний  $N_c$  и  $P_v$  позволили установить, что при легировании *n*-Si примесями переходных металлов (Ni, W, Ta и Ti) образуются ГУ акцепторного типа с параметрами  $E_v+0,20$  эВ (Ni),  $E_v+0,45$  эВ (W),  $E_v+0,41$  эВ (Ta) и  $E_v+0,36$  эВ (Ti) (рис. 1). Эффективное сечение захвата дырки на эти уровни равно  $\sigma_p \approx 10^{-15}$  см<sup>2</sup> ( $\sigma_n/\sigma_p \approx 5$ ) и изменяется с изменением температуры по закону  $\sigma_p \approx T^{-n}$ , где  $n=3...5$ .

В качестве основных методов исследования нами использованы методы нестационарной емкостной спектроскопии (НЕСГУ) и фотоемкости, подробно описанные в [1].

Известно, что скорость термической эмиссии носителей с ГУ в одну из зон  $e_n(e_p)$  для случая  $e_n \gg e_p$  равна

$$e_n = \sigma_n v_n N_c \cdot \exp\left(-\frac{E_T}{kT}\right) = \theta_T^{-1}.$$

Здесь  $v_n$  — тепловая скорость электронов,  $\theta_T$  — время релаксации заполнения глубокого уровня электронами, остальные обозначения общепринятые.

С помощью же метода фотоемкости измеряют скорости оптической перезарядки. Скорость термической эмиссии находят из измерений величины барьерной емкости обратно смещенного *p-n*-перехода или барьера Шоттки в процессе изменения заполнения глубоких уровней электронами или дырками. Из зависимости  $\lg(\theta T^2) = f(1/T)$  находят энергию ионизации ГУ и сечение захвата носителей  $\sigma_n$ .

Измерение спектров НЕСГУ проводилось на автоматизированной установке, в которой в качестве измерителя емкости использован мост полных проводимостей МПП-300. Работа установки основана на измерении емкости диода  $C(t)$  в фиксированные моменты времени  $t_1$  и  $t_2$  после включения обратного смещения, определения разности  $\Delta C = C(t_1) - C(t_2)$  и регистрации зависимости  $\Delta C$  от температуры.

Определенные требования предъявляются и к исследуемым образцам. Оптимальным считается та-

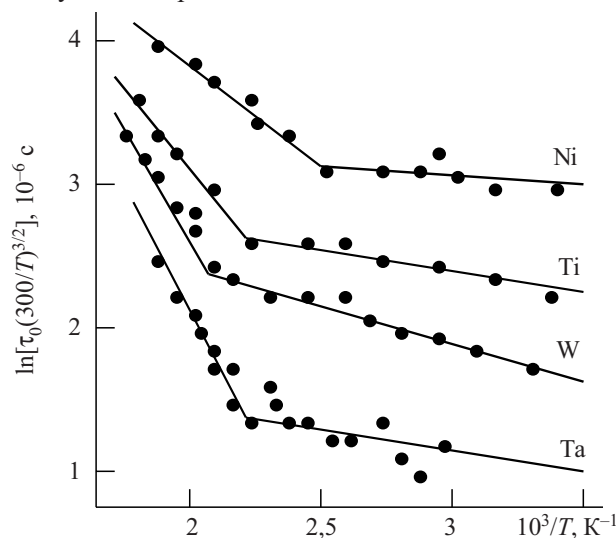


Рис. 1. Температурная зависимость времени жизни дырок в *n*-Si с примесями переходных металлов

кое соотношение, когда концентрация компенсирующей примеси  $N_i$  меньше концентрации мелкой  $N_m$ , т. е.  $N_i/N_m \ll 1$  (для наших измерений  $N_i/N_m \geq 10^{-4}$ ). Для структур на кремнии, легированном W, Ta и Ti, это условие не выполняется, поэтому исследования спектров здесь могут носить только оценочный характер. Исходя из этого мы подробно остановились на исследованиях кремниевых структур с примесью никеля.

Исследуемые образцы  $n$ - и  $p$ -Ge содержали в качестве мелкой примеси соответственно сурьму или галлий. Никель вводился при выращивании кристалла. Диодные структуры для измерений представляли собой барьеры Шоттки (полученные напылением Au или Sb на  $n$ - и  $p$ -Ge, соответственно) и  $p$ - $n$ -переходы на  $n$ -Ge<Ni>, изготовленные вжиганием In в вакууме.

Несмотря на большое число работ, посвященных исследованию ГУ Ni в Ge и Si, сведения относительно энергетического спектра Ni в них неоднозначны [2—6]. Кроме того, наблюдается большой разброс значений энергии ионизации уровней никеля в кремнии. По-видимому, это связано с несовершенством использованных методик и сложностью поведения никеля в кремнии.

Эксперименты показали, что диффузионное легирование Si<Ni> приводит к образованию трех глубоких уровней акцепторного типа с энергиями ионизации  $E_c - 0,20$  эВ (уровень А, см. рис. 2),  $E_c - 0,41$  эВ (уровень В) и  $E_v + 0,18$  эВ (уровень С). Определены эффективные сечения захвата основных носителей на эти центры:  $\sigma_n = 3,20 \cdot 10^{-16}$  см<sup>2</sup>,  $\sigma_p = 1,10 \cdot 10^{-16}$  см<sup>2</sup> и  $\sigma_p = 1,01 \cdot 10^{-13}$  см<sup>2</sup>. Концентрации этих центров нахо-

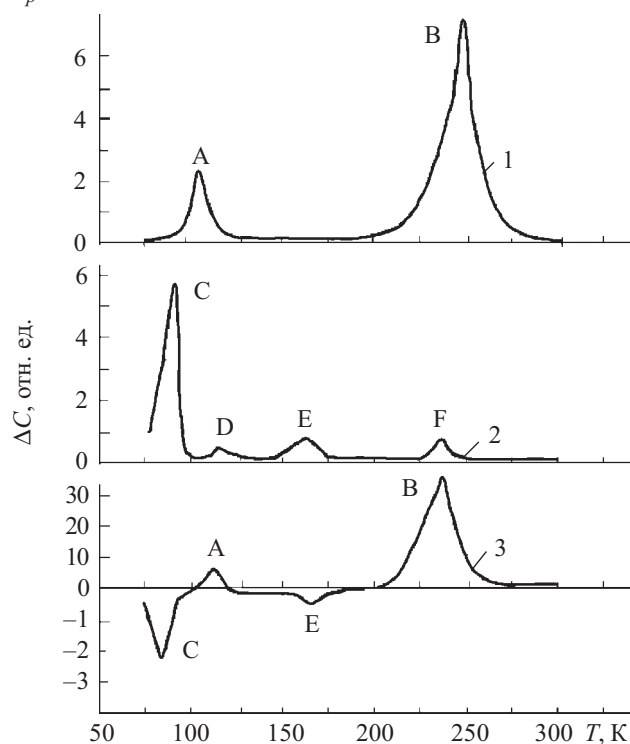


Рис. 2. Спектры НЕСГУ Si<Ni>:

1 — для структур на основе  $n$ -Si<Ni>; 2 — для структур на основе  $p$ -Si<Ni>; 3 — спектр для  $n$ -Si<Ni>, измеренный в режиме инжекции

дится в прямой зависимости от температуры диффузии и скорости охлаждения образцов после высокотемпературной обработки ( $N_i \approx 10^{13} \dots 10^{14}$  см<sup>-3</sup>). ГУ уровней D, E и F обладают незначительной концентрацией и нестабильны во времени.

Спектр НЕСГУ, показанный кривой 3 на рис. 2, снят для  $p$ - $n$ -перехода на  $n$ -Si<Ni> в режиме инжекции [1, с. 25], когда глубокий уровень частично можно заполнить неосновными носителями путем пропускания прямого тока. В этом случае центры, которые создают глубокие акцепторные уровни С и Е, находящиеся в нижней половине запрещенной зоны кремния, компенсируются инжектированными дырками, вследствие чего уменьшается полный заряд акцепторов, что приводит к уменьшению емкости. Глубокий уровень  $E_v + 0,20$  эВ, найденный из измерений времени жизни неосновных носителей с учетом ошибки измерения, имеет ту же природу, что и уровень  $E_v + 0,18$  эВ, определенный из НЕСГУ.

Из измерений фотоэлектрических свойств Si<Ni> определена величина энергии оптической ионизации ГУ никеля, которая находится в удовлетворительном согласии со значениями энергии термической ионизации.

Известно, что никель в германии является двойным акцептором и образует два ГУ в запрещенной зоне. Из спектров НЕСГУ мы также обнаружили два ГУ никеля акцепторного типа в германии с энергиями ионизации  $E_c - 0,30$  эВ и  $E_v + 0,23$  эВ с  $\sigma_n = 8,5 \cdot 10^{-15}$  см<sup>2</sup> и  $\sigma_p = 9,7 \cdot 10^{-13}$  см<sup>2</sup>. 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, т. е. Ni в Si также является двойным акцептором (уровни В и С); ГУ  $E_c - 0,20$  эВ связан со структурным дефектом, возникающим при диффузии атомов никеля.

Исследовано влияние низкотемпературного ( $T = 100 \dots 600^\circ\text{C}$ ) отжига (НТО) на поведение атомов никеля в кремнии и установлено, что состояния электрически активных центров никеля в кремнии устойчивы во времени при температуре ниже  $200^\circ\text{C}$ . Из анализа кинетики низкотемпературного отжига при температуре выше  $200^\circ\text{C}$  оценена энергия термической активации отжига ГУ с  $E_c - 0,41$  эВ, составившая  $1,2 \dots 1,5$  эВ. Наблюдающаяся кинетика отжига объяснена в рамках модели Пеннинга. Уменьшение концентрации электрически активных центров в процессе отжига является следствием незначительного смещения узельных атомов никеля в междоузлие.

С целью исследования радиационной стойкости барьерные структуры на Si<Ni> были подвергнуты  $\gamma$ -облучению (интенсивность потока квантов  $I = 2,58 \cdot 10^{12}$  кв·см<sup>-2</sup>·с<sup>-1</sup>). Установлено, что  $\gamma$ -облучение не изменяет концентрацию и параметры ГУ никеля в  $n$ -Si и присутствие никеля в малых концентрациях не влияет на скорость радиационного дефектообразования до доз  $10^{18}$  кв·см<sup>-2</sup>.

С целью выяснения структуры центра, возникающего при диффузионном легировании кремния никелем, и его зарядового состояния были проведены исследования парамагнитных свойств образующих-

ся центров никеля с помощью ЭПР. Был обнаружен новый спектр ЭПР-центров, связанных с никелем в кремнии *n*-типа проводимости. Этот спектр возникает от центра в отрицательном зарядовом состоянии, включающего атом никеля в положении замещения. Показано, что симметрия наблюдающегося парамагнитного центра и параметры сверхтонкого взаимодействия находятся в согласии с моделью Уоткинса для ионов переходных металлов в кремнии.

В работе исследовались также нестационарные электронные процессы в МДП-структурах на основе Si с целью разработки новых приборов на их основе. Исследуемые структуры получены на основе Si *n*- и *p*-типов, легированных соответственно фосфором и бором, с исходным  $\rho=0,005\dots 20 \text{ Ом}\cdot\text{см}$ . Окисел получен термообработкой Si-пластин последовательно в сухом, влажном и сухом кислороде («составной» окисел). Толщина полученных окислов составила 0,4—0,8 мкм. После напыления алюминия с помощью фотолитографии формировались затворы различного диаметра.

В [7] было показано, что при приложении к структуре Al-SiO<sub>2</sub>-*n*Si некоторого порогового напряжения ( $U_{кр}$ ) она из высокоомного состояния переключается в низкоомное. При этом в результате электрического пробоя диэлектрика в тонкой пленке SiO<sub>2</sub> образуется токопроводящая алюминиевая дорожка (канал), и расплавленный алюминий под действием электрического поля  $E_{кр}=(4\dots 6)\cdot 10^6 \text{ В}\cdot\text{см}^{-1}$  и тепла, выделяемого при переключении структуры, диффундирует в *n*-Si, изменяя тип его проводимости, т. е. образуется *p-n*-переход. Образование *p-n*-перехода происходит за очень короткое время без длительной высокотемпературной диффузии, что исключает загрязняемость кремния в процессе технологических операций. Такой *p-n*-переход имеет коэффициент выпрямления порядка  $10^4\text{—}10^6$  при  $U_{пр}=1 \text{ В}$ .

Образование *p-n*-перехода подтверждено электронно-микроскопическими исследованиями. Свидетельством электродиффузии алюминия в *n*-Si и образования области *p*-типа проводимости непосредственно под каналом (т. е. токопроводящей алюминиевой дорожки в окисле) является изображение локальной области *p*-Si в режиме наведенного тока. Наведенный ток в полупроводнике возникает лишь в том случае, если генерированные электронным лучом неравновесные носители тока разделяются внутренним встроенным полем слоя объемного заряда (СОЗ) *p-n*-перехода. Изображение объекта возникает в виде изменения яркости свечения экрана (рис. 3).

На основании проведенных исследований был предложен способ изготовления переключателя на основе структуры Al-SiO<sub>2</sub>-*n*Si. В закрытом состоянии дифференциальное сопротивление Al-SiO<sub>2</sub>-*n*Si-структур изменяется в пределах  $5\cdot 10^{13}\text{—}10^{11} \text{ Ом}$ , в состоянии высокой проводимости  $I=10^{-3} \text{ А}$ , и в этом состоянии структура может находиться произвольно долго. Для выключения структуры на нее необходимо подать одиночный импульс амплитудой 50—100 В и длительностью 5—10 мкс.

Напряжение переключения  $U_{кр}$  линейно увеличивается с ростом толщины окисного слоя SiO<sub>2</sub> (0,4—

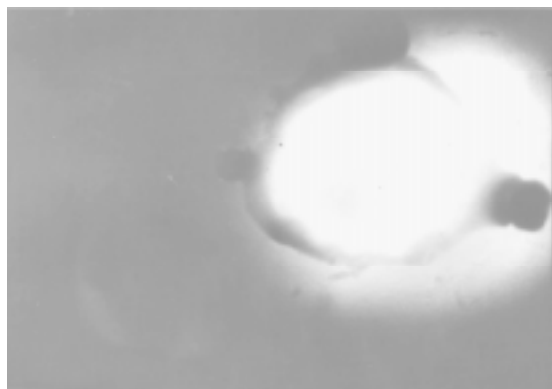


Рис. 3. Микрофотография *p-n*-перехода, образованного в Al-SiO<sub>2</sub>-*n*Si-M-структуре при ее переключении в режиме наведенного тока при  $U_0=34 \text{ кВ}$  ( $\times 1800$ )

0,8 мкм) и практически стабильно в исследуемом интервале температур. Переключение происходит за очень короткое время ( $t \ll 1 \text{ с}$ ). Число переключений составляет  $10^6\text{—}10^7$  раз.

При изготовлении такого переключателя исключается длительный высокотемпературный отжиг для диффузии примесей в полупроводнике, приводящий к возникновению термических напряжений, структурных дефектов и к боковой диффузии под защитный слой окиси при применении планарной технологии.

На основе исследуемой структуры предложена также ячейка памяти (программируемый запоминающий элемент), которая представляет собой последовательно соединенные электронный ключ и полупроводниковый диод, образующиеся под контактом затвора в процессе одной технологической операции — переноса типоменяющей примеси при  $U_{кр}$  из контакта затвора через каналы в диэлектрике в исходную подложку.

Неконтролируемая область формирования канала (под контактом затвора) является достаточно большой, что ведет к заметному разбросу параметров сформированных электродиффузией *p-n*-переходов. Поэтому предложена конструкция диодной матрицы (ДМ, рис. 4) с предварительно заданной локальной областью образования канала в тонком окисле (слой 2) толщиной 0,15—0,3 мкм под электродом затвора 4. Максимальный разброс величины падения напряжения в ДМ из 6 диодов  $\Delta U_{пр.макс}=20 \text{ мВ}$  ( $I_{пр}=1 \text{ мА}$ ) при среднем разбросе  $\Delta U_{пр.ср.}=5 \text{ мВ}$ . Напряжение токовой отсечки для всех диодов в матрице одинаково

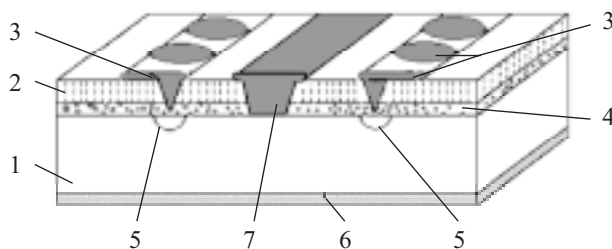


Рис. 4. Поперечный разрез диодной матрицы со структурой Al-SiO<sub>2</sub>-*n*Si-M:

1 — *n*-Si; 2, 4 — первый и второй слой SiO<sub>2</sub>; 3 — дискретный контакт (затвор); 5 — *p*-область; 6, 7 — общие контакты

( $\Delta U_{отс} = 0,85$  В при  $T=300$  К). Разброс прямого падения напряжения диодов в матрице в основном обусловлен разбросом последовательного сопротивления базы, модулированного благодаря инжекции неосновных носителей в  $n$ -Si.

Предложенные конструкции и технология изготовления ДМ позволяют значительно увеличить число элементов на единицу площади при идентичных параметрах прямого падения напряжения при фиксированном  $I_{пр}$ .

\* \* \*

Таким образом, исследование нестационарных электронных процессов в барьерных структурах показало, что состояние электрически активных центров никеля в кремнии устойчиво во времени при термообработке ниже  $200^\circ\text{C}$ . Начиная с  $300^\circ\text{C}$  наблюдается отжиг этих центров. Параметры и концентрация уровней Ni в Si в процессе  $\gamma$ -облучения в интервале доз до  $2 \cdot 10^{18}$  кв.см<sup>-2</sup> не изменяются, и присутствие относительно малого количества междоузельных атомов никеля не влияет на скорость радиационного дефектообразования.

Предложены способы изготовления полупроводникового переключателя, ячейки памяти и диодной матрицы с идентичными параметрами (по  $U_{пр}$ ) на основе Al-SiO<sub>2</sub>- $n$ Si-M-структуры.

ИСПОЛЬЗОВАННЫЕ ИСТОЧНИКИ

1. Берман Л. С., Лебедев А. А. Емкостная спектроскопия глубоких центров в полупроводниках.— Л.: Наука, 1981.
2. Chiavorotti G. P., Conti M. Characterization of properties of nickel in silicon using thermally stimulated capacitance method // Solid State Electronics.— 1977.— Vol. 20.— P. 907—909.
3. Indusckhar H., Kumar V. Electrical properties of nickel-related deep levels in silicon // J. Appl. Phys.— 1987.— Vol. 61, N 4.— P. 1449—1455.
4. Lemke H. Dotierung seigenschaften von nickel in silicium // Phys. Stat. Sol.— 1987.— Vol. 99.— P. 205—213.
5. Котина И. М., Курятков В. В. Емкостная спектроскопия глубоких центров Cu, Au, Ag и Ni в германии // ФТП.— 1987.— Т. 21, вып. 6.— С. 1039—1043.
6. Фистуль В. И. Атомы легирующих примесей в полупроводниках.— М.: Физматлит, 2004.
7. Iskender-zade Z. A., Abdullaev A. G., Jafarova E. A., Akhundov M. R. Investigation of p-n junctions in n-Si obtained by electromigration of Al through a thin SiO<sub>2</sub> film // Solid State Communications.— 1984.— Vol. 49, N 3.— P. 273—276.

ВЫСТАВКИ. КОНФЕРЕНЦИИ

МГТУ им. Н. Э. Баумана  
и ОАО Центральный научно-исследовательский технологический институт "ТЕХНОМАШ"  
организуют и проводят в сентябре 2007 года на базе Московского государственного технического университета им. Н. Э. Баумана



XIII Международную научно-техническую конференцию  
**"ВЫСОКИЕ ТЕХНОЛОГИИ В ПРОМЫШЛЕННОСТИ РОССИИ"**  
**(МАТЕРИАЛЫ И УСТРОЙСТВА ФУНКЦИОНАЛЬНОЙ ЭЛЕКТРОНИКИ И МИКРОФОТОНИКИ)**

Справки по e-mail:

belyanin@tehnomash.ru  
samoylovich@tehnomash.ru

Белянин Алексей Федорович  
Самойлович Михаил Исаакович

Министерство высшего и среднего специального образования Республики Узбекистан,  
Физический факультет Национального университета Узбекистана им. Мирзо Улугбека  
организуют 1—3 февраля 2007 года в г. Ташкенте

Международную конференцию

**"НЕРАВНОВЕСНЫЕ ПРОЦЕССЫ В ПОЛУПРОВОДНИКАХ  
И В ПОЛУПРОВОДНИКОВЫХ СТРУКТУРАХ"**

Предполагается заслушать доклады по следующим направлениям:

1. Фотозлектрические явления в полупроводниках.
2. Термо- и тензозлектрические явления в полупроводниках.
3. Поверхностные кинетические эффекты в полупроводниках.
4. Методы контроля параметров полупроводниковых материалов и приборов.
5. Нанозлектрика и физические процессы в наноразмерных структурах.
6. Методика преподавания физических дисциплин.

700178, г. Ташкент, Узбекистан, ВУЗ городок, НУУз им. М. Улугбека, Физический факультет.

Тел. 396-08-94, 396-02-32

E-mail: vlasov@uzsci.net, omamatkarimov@nuuz.uzsci.net