

В.А. Бурлаков, А.Е. Погорелов, А.В. Филатов

**ЭЛЕКТРОФИЗИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА ПЛЕНОК ЖЕЛЕЗА,
ЛЕГИРОВАННЫХ УГЛЕРОДОМ**

Бурлаков Виктор Александрович – аспирант, Институт металлофизики им. Г.В. Курдюмова НАН Украины, Киев, odinpwnzpacan@gmail.com

Погорелов Александр Евгеньевич – доктор физико-математических наук, старший научный сотрудник, Институт металлофизики им. Г.В. Курдюмова НАН Украины, Киев, pog.alexander@gmail.com

Филатов Александр Валентинович – доктор физико-математических наук, заведующий отделом, Институт металлофизики им. Г.В. Курдюмова НАН Украины, Киев, filatov@imp.kiev.ua

*В работе рассмотрено влияние легирования нанопленки железа углеродом на электрические свойства системы металл-полупроводник. Объектом исследования является образец на полупроводниковой подложке **p-типа** и **n-типа** матрицы из 16-ти контактов диаметром 2 мм и толщиной до 100 нм, восемь из которых из чистого железа и восемь из железа, легированного углеродом. Показано, что при легировании железа углеродом на подложке **n-типа** возникает выпрямляющий контакт типа диода Шоттки, что связано с увеличением работы выхода и понижением уровня Ферми в соответствующей системе.*

***Ключевые слова:** нанопленка, железо, легирование углеродом, энергия Ферми, ферромагнетик, полупроводник.*

ВСТУПЛЕНИЕ

В работе [1] изучались электрические свойства МТJ-системы Fe\MgO\Fe при легировании одного из слоев ферромагнетика углеродом. В результате на вольт-амперных характеристиках МТJ-системы образовалась область с отрицательным дифференциальным сопротивлением, характерная для туннельного диода. Принято считать, что углерод относится к классу полуметаллов. Это объясняли тем, что имело место незначительное (~ 30 мэВ) перекрытие зон при концентрации носителей заряда ниже по сравнению с металлами. Известные результаты, указывающие на возможность существования полупроводниковых свойств самого углерода, которые были получены с использованием оптических методов исследования при низких температурах. Достоверно установлено, что к таким структурам относятся линейные цепочки атомов углерода (карбин), аморфный углерод, легированный алмаз и лонсдейлит [2].

ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ

Для установления природы проявления полупроводниковых свойств МТJ-системой при легировании углеродом, было проведено исследование взаимодействия нанопленки чистого железа и железа, легированного углеродом, с полупроводником p-типа и n-типа. В радиоэлектронике контакты металл – полупроводник используются как омические выводы полупроводниковых приборов, так и в качестве быстродействующих диодов. Соответственно различают невыпрямляющий омический контакт и выпрямляющий контакт металл – полупроводник, известный как диод Шоттки. Выпрямляющий контакт имеет нелинейную вольт-амперную характеристику

(ВАХ), аналогічну ВАХ р-п – переходу [3]. Тип отриманого контакту визначається співвідношенням між роботою виходу електронів з напівпровідника і з металу, а також знаком і густиною заряду на напівпровідниковій підложці. В разі випрямляючого контакту для напівпровідника n-типу робота виходу електронів в напівпровіднику $A_{\text{пн-п}}$ повинна бути менше роботи виходу електронів в металі $A_{\text{м}}$. Тоді рівень Фермі металу знаходиться нижче рівня Фермі в напівпровіднику і заповненість зони провідності напівпровідника вище заповненості відповідних енергетических рівнів металу. Для напівпровідника р-типу ситуація має зворотний характер, робота виходу електронів повинна бути більше, ніж в металі.

МЕТОДИКА І МАТЕРІАЛИ

В експерименті використовували напівпровідникові підложки двох типів: КЭФ – монокристалічний кремній, легірований фосфором – данна система має n-тип провідності; і КДБ – монокристалічний кремній, легірований бором – система має р-тип провідності. Перед розміщенням підложки в камеру знімали окисний шар в плавиковій кислоті і остаточно їх промивали в дистильованій воді. Напыление контактних площадок діаметром 2 мм з чистого заліза і заліза, легірованого вуглеродом, проводили електронно-лучевим методом в установці ВУП-5. Відстань між сусідніми площадками становило 3 мм. Напыление проводили наступним чином. На кремнієву підложку накладували маску з нержавіючої сталі, в якій було зроблено 16 круглих отворів, як зображено на схемі рис. 1а. Два крайніх вертикальних рядів отворів (зліва і справа на схемі рис. 1а) закривали щільною маскою з металічної фольги і поміщали в камеру, де напыляли тонкий (до 5 нм) шар вуглерода. Потім наносили шар заліза товщиною 20–30 нм зі швидкістю напылення 10–20 Å/хв і проводили віджиг при температурі 300 °С впродовж 30 хвилин для забезпечення дифузії вуглерода в залізо. Як показали оцінки, в таких умовах дифузія вуглерода в залізо на 6–8 порядків вище, ніж в кремній [4, 5], тому дифузійною вуглерода в кремній можна пренебрати. Після цього знімали маски з крайніх контактів і напыляли залізо товщиною 80–100 нм. Таким чином, по краях були сформовані два вертикальних ряди контактів з чистого заліза, позначені «Fe» в таблиці 1, і два ряди контактів з заліза, що містить вуглерод, по центру підложки, позначені «Fe+C» в таблиці 1.

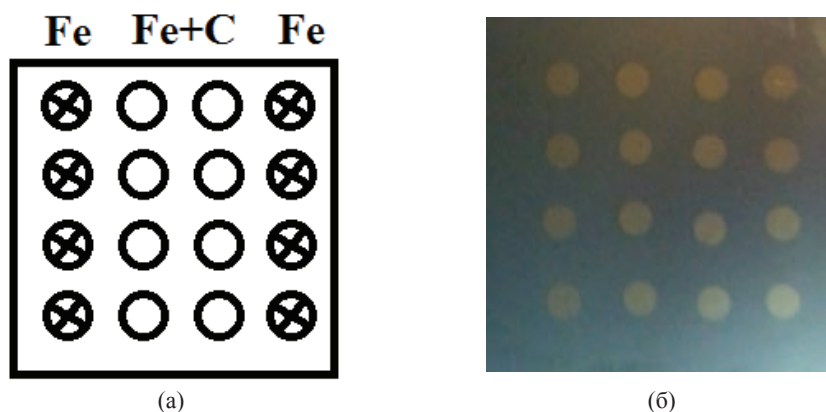


Рис. 1. Розташування на кремнієвих підложках контактів заліза і заліза, легірованого вуглеродом: а – схема, б – зразок після напылення

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

На полученных образцах проводили измерения сопротивления между напылёнными контактными площадками при комнатной температуре. Оказалось, что для системы на полупроводниковой подложке КДБ р-типа сопротивление между различными парами контактов составило до 100 Ом как для контактов из железа, так и для контактов из железа, содержащего углерод, и не изменялось при изменении направления протекающего тока. Это соответствует невыпрямляющему омическому контакту.

Иная картина наблюдалась для контактов на подложке КЭФ с n-типом проводимости. Результаты измерения сопротивления некоторых пар контактов на подложке КЭФ с n-типом проводимости сведены в таблицу 1.

Таблица 1.

Сопротивления пар контактов на подложке КЭФ

Fe ->KEF-> Fe		Fe->KEF->Fe+C		Fe+C ->KEF->Fe+C	
-+	+ -	-+	+ -	-+	+ -
110 Ом	110 Ом	3,0 кОм	6,0 кОм	4,5 кОм	6,3 кОм
96 Ом	96 Ом	8,9 кОм	10,8 кОм	7,7 кОм	13,3 кОм
339 Ом	337 Ом	4,1 кОм	4,4 кОм	28,8 кОм	33,0 кОм
519 Ом	503 Ом	3,1 кОм	3,6 кОм	13,0 кОм	23,0 кОм

Как видим, на подложке КЭФ с n-типом проводимости сопротивление для пар контактов из чистого железа не изменялось от направления протекающего тока и составляло от 100 до 500 Ом. Для пар контактов из железа, содержащего углерод, сопротивление изменялось в зависимости от полярности приложенного напряжения и составляло несколько кОм.

Изменения сопротивления связано с возникновением для электронов, переходящих из полупроводника в металл, потенциального барьера, который равен разности энергий исходных уровней Ферми полупроводника и металла. По своей физической сути он похож на барьер при формировании р-n-перехода.

Полученные результаты свидетельствуют о том, что наноразмерная пленка легированного углеродом железа на кремнии с n-типом проводимости формирует выпрямляющий контакт и имеет свойства, характерные для диода Шоттки. Это подтверждает предположение, сделанное в работе [2] о том, что система Fe\MgO\Fe при легировании углеродом может проявлять полупроводниковые свойства.

ВЫВОДЫ

Полученные в работе результаты свидетельствуют о том, что обычный омический контакт железо – полупроводник удается превратить при легировании железа углеродом в выпрямляющий контакт с характеристиками, подобными диоду Шоттки. Это может означать, что в нанопленке железа, легированной углеродом, работа выхода увеличивается, а уровень Ферми располагается ниже уровня Ферми полупроводника. Эти результаты могут быть использованы для объяснения появления на ВАХ области отрицательного дифференциального сопротивления в легированной проводящей примесью МТJ-системе.

В роботі розглянуто вплив легування вуглецем наноплівки заліза на електричні властивості системи метал-напівпровідник. Об'єктом дослідження є зразок на напівпровідниковій підкладці p-типу та n-типу з 16-ти контактів діаметром 2 мм і товщиною до 100 нм, вісім з яких з чистого заліза та вісім із заліза, легованого вуглецем. Показано, що при легуванні заліза вуглецем на підкладці n-типу виникає випрямляючий контакт типу діода Шотткі, що пов'язано зі зростанням роботи виходу та пониженням рівня Фермі в відповідній системі.

Ключові слова: наноплівка, залізо, легування вуглецем, енергія Фермі, ферромагнетик, напівпровідник

The effect of carbon doping of an iron nanofilm on the electrical properties of a metal-semiconductor system is considered. The object of study is a sample on a p-type and n-type semiconductor substrate with matrix of 16 contacts with a diameter of 2 mm and thickness 100 nm. Eight of which are pure iron and eight are carbon-doped iron. It is shown that when iron is doped with carbon on an n-type substrate, a rectifying contact such as a Schottky diode occurs. This is due to an increase in the work function and a decrease in the Fermi level in the studied system.

Key words: nanofilm, ferrum, carbon alloy, Fermi energy, ferromagnetic, semiconductor

- [1] Negative differential resistance in magnetic tunnel junction systems // A. Pogorelov, A. Filatov, Ye. Pogoryelov // *Physica Status Solidi (b)*. – January 2014, p. 172-177. <https://doi.org/10.1002/pssb.201349258>
- [2] С.К. Брантов, А.Н. Терещенко, Э.А. Штейнман, Е.Б. Якимов. Физические свойства пленок углерода, полученных при пиролизе метана в электрическом поле // *Журнал технической физики*, 2016, том 86, вып. 3 – С. 110-113.
- [3] J. Lutz, H. Schlangenotto, U. Scheuermann, R. De Doncke / *Schottky Diodes // Semiconductor Power Devices*, pp. 271-293.
- [4] П.С. Гринчук, Н.М., С.П. Фисенко, Ю.А. Ходыко. Рост нанослоев карбида кремния при контакте пористого углерода с расплавленным кремнием. *Инженерно-Физический Журнал* (2017), том 90, с. 1162-1166.
- [5] Лариков Л.Н., Исайчев В.И. *Диффузия в металлах и сплавах*. – К.: Наукова думка, 1987. – 512 с.