

В. В. БРУС, д. ф.-м. н. З. Д. КОВАЛЮК, д. ф.-м. н. П. Д. МАРЬЯНЧУК,  
к. ф.-м. н. И. Г. ОРЛЕЦКИЙ, к. ф.-м. н. Э. В. МАЙСТРУК

Украина, Черновицкое отделение ИПМ НАНУ,  
ЧНУ им. Юрия Федьковича  
E-mail: chimsp@unicom.cv.ua

Дата поступления в редакцию  
14.05 2010 г.

Оппонент к. т. н. А. В. ИВАЩУК  
(НТУУ «КПИ», г. Киев)

## СВОЙСТВА МЕТАЛЛИЧЕСКИХ КОНТАКТОВ НА ПЛЕНКАХ $TiO_2$ , ИЗГОТОВЛЕННЫХ МЕТОДОМ РЕАКТИВНОГО МАГНЕТРОННОГО РАСПЫЛЕНИЯ

*Исследованы вольт-амперные характеристики металлических контактов на тонких пленках диоксида титана, а также влияние отжига структур в вакууме на их электрические свойства.*

Благодаря своим электрическим и оптическим свойствам диоксид титана является перспективным полупроводниковым материалом для использования в различных полупроводниковых приборах. В связи с этим достаточно актуальным является создание омических контактов к диоксиду титана. Эта проблема на сегодняшний день исследована не в полной мере, особенно для тонких пленок  $TiO_2$ .

Для достижения высокой эффективности работы полупроводниковых приборов важную роль играют металлические контакты к полупроводниковой структуре. Они должны иметь свойства омических контактов, т. е. линейные вольт-амперные характеристики (ВАХ) и малое электрическое сопротивление. Такие условия выполняются при образовании обогащенной основными носителями заряда приконтактной области со стороны полупроводника.

Практика показывает, что соотношение между работой выхода электронов из металла и работой выхода из полупроводника не является единственным критерием оценки омических свойств контактов. Обязательно следует учитывать поверхностные явления, параметры решетки, образование химических соединений в месте контакта, степень легирования полупроводникового материала и др.

В настоящей работе исследовались ВАХ различных металлических контактов (Al, Cr, In, Mo, Ti) на тонких пленках диоксида титана и влияние отжига структур в вакууме на их электрические свойства.

### Экспериментальная часть

Нанесение пленок  $TiO_2$  осуществлялось с помощью реактивного магнетронного распыления мишени из чистого титана при постоянном напряжении в атмосфере смеси аргона и кислорода в универсальной вакуумной установке Laybold-Heraeus L560.

Титановую мишень, представляющую собой шайбу диаметром 100 мм и толщиной 5 мм, размещали над столиком магнетрона с водяным охлаждением на расстоянии 7 см от закрепленных подложек.

Предварительно очищенные подложки (пластины стекла) размещали над магнетроном. Для обеспечения однородности пленок по толщине столик вращался со скоростью 5 об/мин. Температуру подложек контролировали системой термодар в вакуумной камере и поддерживали на заданном уровне ( $100^\circ C$ ). После установки подложек воздух из вакуумной камеры откачивался до давления  $10^{-4}$  Па.

Парциальное давление аргона в технологическом процессе составляло 0,7 Па, кислорода — 0,02 Па при мощности магнетрона 400 Вт.

Для удаления неконтролируемых примесей (загрязнения) использовали кратковременное протравливание поверхности мишени бомбардирующими ионами аргона.

Толщину пленок  $TiO_2$  (около 0,4 мкм) измеряли с помощью интерферометра МИИ-4 по стандартной методике. С помощью термозонда было установлено, что все пленки имели  $n$ -тип проводимости.

Металлические контакты на образцах (рис. 1) формировали сразу после нанесения пленок  $TiO_2$ . Титановые и молибденовые контакты наносили с помощью магнетронного распыления соответствующих мишеней в атмосфере аргона. Алюминий, хром и индий наносили с помощью резистивного испарения из вольфрамовых тиглей. Площадь второго контакта (рис. 1) составляла  $0,14 \text{ см}^2$  для всех исследуемых металлов.

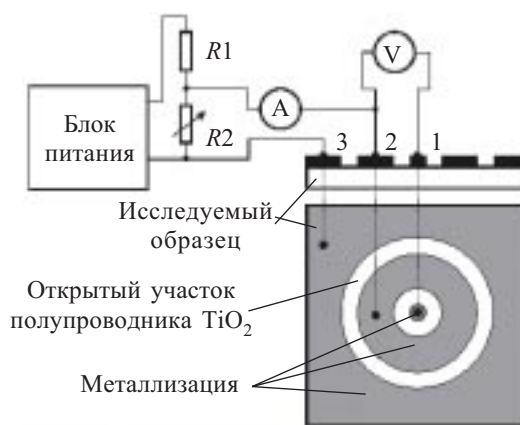


Рис. 1. Схема измерения сопротивления контактов 1, 2, 3 трехзондовым методом

Отжиг образцов проводили в кварцевых ампулах, из которых откачивали воздух до давления остаточных газов  $10^{-3}$  Па, при температуре  $350^{\circ}\text{C}$  в электропечи СНОЛ 15/1300 с микропроцессорным регулятором температуры типа RT26-S765 в течение 1 часа.

Для подробного исследования электрических свойств контактов проводились измерения ВАХ с помощью трехзондового метода.

В приведенной схеме ток через контакты 2 и 3 задается источником питания и делителем напряжения (резисторы  $R1$  и  $R2$ ). В отсутствие ответвлений тока амперметр измеряет ток, протекающий через контакт 2. Разность потенциалов между этим контактом и полупроводником фиксируется мультиметром Picotest M3500A. Контакт 1 является чувствительным к потенциалу полупроводника электродом независимо от того, присутствует ли на нем контактная разность потенциалов, поскольку он находится в равновесии с полупроводником (т. е. под тем же потенциалом).

Направление прохождения тока через контакт 2 изменяется при изменении полярности подключения к блоку питания.

Чтобы описать электрические свойства контактов используют понятие «удельное сопротивление контакта»  $\rho_k$ , т. е. сопротивление контакта единичной площади. Поскольку полное сопротивление контакта  $R_k$  уменьшается с увеличением площади металлизации  $S_k$ , то можно записать:

$$\rho_k = R_k S_k.$$

Если омические свойства контактов неудовлетворительны, то  $\rho_k$  зависит от напряжения на контакте  $U$  [1].

### Результаты исследований и их обсуждение

При измерении вольт-амперных характеристик контактов во всех случаях при обратном смещении на металл подавался положительный потенциал, а при прямом смещении — отрицательный. На рис. 2 показаны ВАХ различных металлических контактов к пленке  $\text{TiO}_2$ .

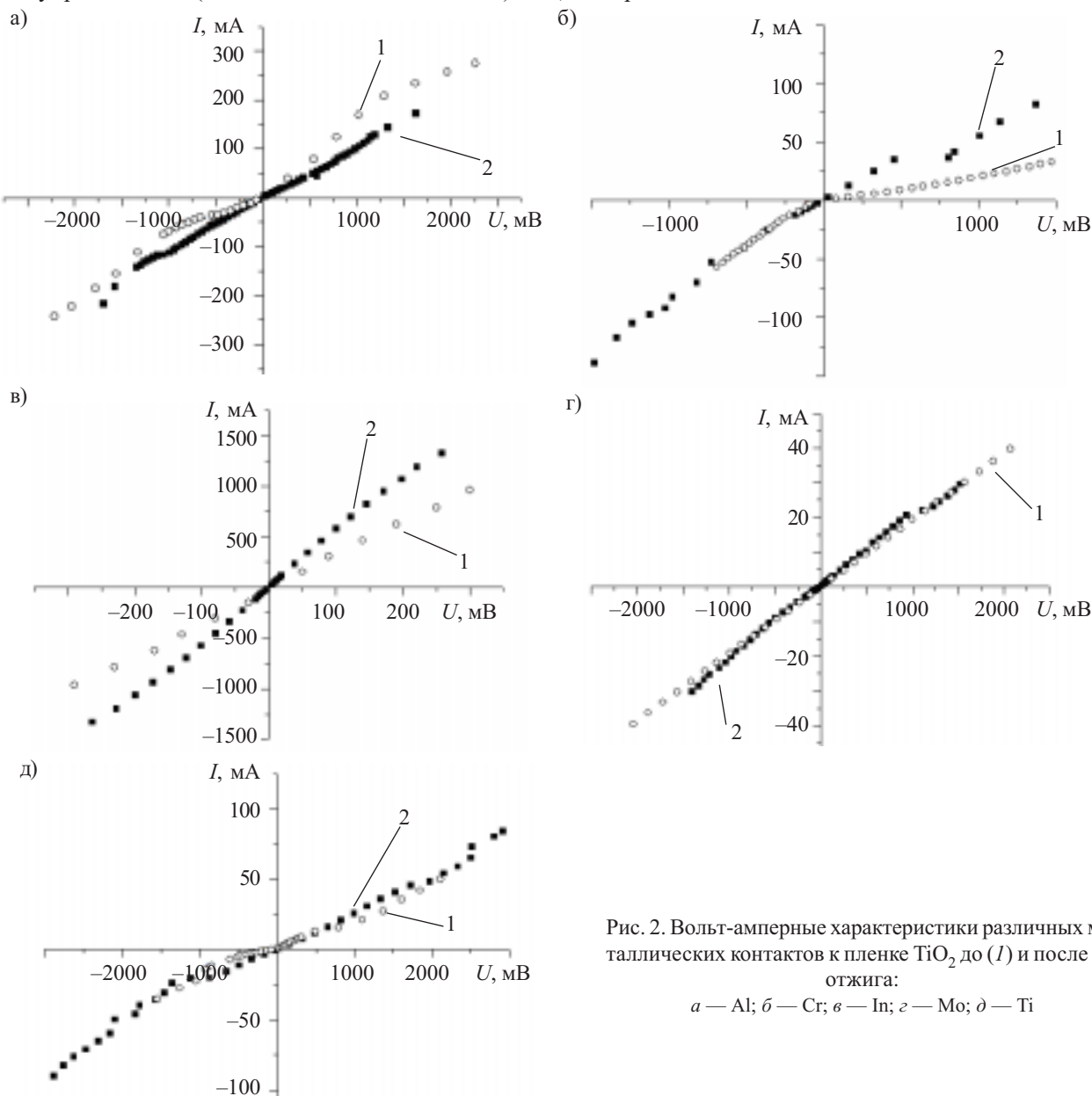


Рис. 2. Вольт-амперные характеристики различных металлических контактов к пленке  $\text{TiO}_2$  до (1) и после (2) отжига:  
 а — Al; б — Cr; в — In; г — Mo; д — Ti

Форма кривой  $I$  на рис. 2, *a* свидетельствует о том, что алюминий формирует неомический контакт с пленкой диоксида титана. Такое поведение может быть обусловлено протеканием окислительно-восстановительных реакций на границе раздела фаз «алюминий — диоксид титана» после нанесения контакта. Приконтактный слой Al окисляется путем экстрагирования анионов кислорода из пленки  $TiO_2$ . После диффузии кислорода у поверхности дефектной подложки  $TiO_{2-x}$  образуется слой гетерогенной смеси оксида алюминия и металлического алюминия [2]. После отжига контакта наблюдается выравнивание обеих ветвей ВАХ. Удельное сопротивление контакта  $TiO_2/Al$  после отжига составляет  $1,4 \text{ Ом}\cdot\text{см}^2$ .

ВАХ контакта  $TiO_2/Cr$ , представленная на рис. 2, *b*, показывает, что этот контакт также обладает неомическими свойствами, поскольку наклоны ветвей ВАХ при разной полярности напряжения отличаются. После отжига наблюдается изменение наклона прямой ветви ВАХ, в то время как наклон обратной остается без изменений.

В процессе напыления пленки хрома образуется слой оксида хрома  $CrO_2$ , который хорошо смачивает поверхность диоксида титана (т. е. наблюдается четкая граница раздела двух оксидов, без пустот и неоднородностей). Окислительно-восстановительные реакции между двумя фазами протекают путем динамического внедрения кислорода из кристаллической решетки  $TiO_2$  в пленку хрома. Долговременный отжиг пленки при высокой температуре приводит к растворению хрома в  $TiO_2$  [3].

Из ВАХ контакта  $TiO_2/In$  на рис. 2, *в* видно, что этот контакт является омическим, поскольку величина его удельного сопротивления относительно мала ( $\rho_k = 4,5 \cdot 10^{-2} \text{ Ом}\cdot\text{см}^2$ ), а ветви ВАХ — прямолинейны и симметричны. Следует отметить, что отжиг в вакууме уменьшает удельное сопротивление контакта  $TiO_2/In$  до значения  $2,5 \cdot 10^{-2} \text{ Ом}\cdot\text{см}^2$ .

ВАХ контакта  $TiO_2/Mo$  (рис. 2, *г*) имеет прямолинейный и симметричный вид, но значение удельного сопротивления контакта ( $\rho_k = 7,5 \text{ Ом}\cdot\text{см}^2$ ) несколько велико для качественного омического контакта. При нанесении молибденовой пленки атомы Mo взаимодействуют с кислородом из диоксида титана, что приводит к образованию аморфного слоя оксидов молибдена различной степени окисленности и к увели-

чению шероховатости поверхности  $TiO_2$  [3]. Температурная обработка практически не влияет на вид вольт-амперной характеристики.

Контакт  $TiO_2/Ti$  (рис. 2, *д*) не обладает выраженными омическими свойствами, о чем свидетельствуют большое удельное сопротивление ( $\rho_k = 6 \text{ Ом}\cdot\text{см}^2$ ) и непрямолинейность и несимметричность ветвей ВАХ. Ti взаимодействует с  $TiO_2$ , образуя слой  $TiO_x$  оксида титана, обедненного кислородом, толщиной меньше толщины нанесенной пленки. При температуре  $400^\circ\text{C}$  наблюдается диффузия Ti в поверхностный слой  $TiO_2$ , а при  $700^\circ\text{C}$  имеет место диффузия вглубь пленки диоксида титана [4]. Отжиг не приводит к существенным изменениям свойств контакта.

### Выводы

Таким образом, при исследовании вольт-амперных характеристик металлических контактов на тонких пленках  $TiO_2$ , изготовленных методом реактивного магнетронного распыления при постоянном напряжении, установлено, что критериями омичности контакта (малое удельное сопротивление, прямолинейность и симметричность ветвей ВАХ) соответствует лишь индиевый контакт, удельное сопротивление которого уменьшается после отжига в вакууме. Для остальных металлов не наблюдается существенных изменений электрических свойств контактов после отжига. В случае использования для контактов Al, Cr, Mo и Ti на границе раздела «металл — полупроводник» имеют место окислительно-восстановительные реакции, поэтому можно предположить, что образование неомических контактов перечисленных металлов с тонкими пленками диоксида титана обусловлено формированием неоднородных гетерогенных слоев, которые ухудшают электрические свойства контактов.

### ИСПОЛЬЗОВАННЫЕ ИСТОЧНИКИ

1. Фаренбрух А., Бьюб Р. Солнечные элементы: Теория и эксперимент. — М.: Энергоатомиздат, 1987.
2. Dake L. S., Lad R. J. Properties of aluminum overlayers on chemically modified  $TiO_2(110)$  // J. Vac. Sci. Technol. A — 1995. — Vol. 43. — P. 15—29.
3. Diebold U. The surface science of titanium dioxide // Surface Science Reports. — 2003. — Vol. 43. — P. 53—229.
4. Mayer J. T., Diebold U., Madey T. E., Garfunkel E. Titanium and reduced titania overlayers on titanium dioxide (110) // J. Electr. Spectrosc. Rel. Phen. — 1995. — Vol. 73. — P. 1—11.

### НОВЫЕ КНИГИ

НОВЫЕ КНИГИ



Печатные платы / Под ред. К. Ф. Кумбза. — М.: Техносфера, 2011. — 232 с.

В книге рассматриваются все процессы создания и применения печатных плат: проектирование и выбор базовых материалов, изготовление, обеспечение качества и оценки надежности печатных плат и печатных узлов, монтаж плат, включая особенности бессвинцовых технологий пайки, а также методы и средства испытаний применительно к специальным требованиям. Шестое издание дополнено информацией по ценообразованию, количественной оценке технологичности плат, управлению производством и решению экологических проблем.

