

12. Woermann, E. Phase Equilibria in the system CaO–cobalt oxide in air / E. Woermann, A. Muan // J. Inorg. Nucl. Chem. – 1970. – V. 32. – P. 1455–1459.
13. Misfit-Layered Cobaltite with an Anisotropic Giant Magnetoresistance:  $\text{Ca}_3\text{Co}_4\text{O}_9$  / A.C. Masset [et al.] // Phys. Rev. – B. 2000–I. – V. 62, № 1. – P. 166–175.
14. Клындюк, А.И. Структура, тепловое расширение и электрические свойства твердых растворов системы  $\text{BiFeO}_3\text{--NdMnO}_3$  / А.И. Клындюк, Е.А. Чижова // Неорган. матер. – 2015. – Т. 51, № 3. – С. 322–327.
15. Клындюк, А.И. Синтез и термоэлектрические свойства керамики на основе оксида  $\text{Bi}_2\text{Ca}_2\text{Co}_{1.7}\text{O}_y$  / А.И. Клындюк, Н.С. Красуцкая, Е.А. Чижова // Физ. хим. стекла. – 2018. – Т. 44, № 2. – С. 128–137.
16. Effect of erbium substitution on thermoelectric properties of complex oxide  $\text{Ca}_3\text{Co}_2\text{O}_6$  at high temperatures / D Lu [et al.] // J. Rare Earths. – 2008. – V. 26, № 2. – P. 168–172.
17. High-temperature electrical transport behaviors in textured  $\text{Ca}_3\text{Co}_4\text{O}_9$ -based polycrystalline ceramics / Y.–H. Lin [et al.] // Appl. Phys. Lett. – 2009. – V. 94. – P. 072107 (4 pp.).

## СТРУКТУРА И ТЕРМОРЕЗИСТИВНЫЕ СВОЙСТВА ПЛЁНОК АНТИМОНИДА ИНДИЯ, ПОЛУЧЕННЫХ МЕТОДОМ ВЗРЫВНОГО ТЕРМИЧЕСКОГО ИСПАРЕНИЯ

**Е. А. Колесникова<sup>1</sup>, В. В. Углов<sup>1</sup>, А. П. Драпезо<sup>2</sup>,  
А. К. Кулешов<sup>1</sup>, Д. П. Русальский<sup>1</sup>**

---

<sup>1)</sup> *Белорусский государственный университет, пр. Независимости, 4,  
220030 Минск, Беларусь, e-mail: kolesnikova.ar@gmail.com*

<sup>2)</sup> *ООО «Научно-технический центр Вист групп сенсор», ул. Новаторская, 2Б,  
220053, Минск, Беларусь, e-mail: vgs-05@mail.ru*

В работе рассматриваются структурные изменения и терморезистивные свойства плёнок антимионда индия на монокристаллических подложках арсенида галлия, полученных методом взрывного термического испарения, в зависимости от температуры осаждения. Было установлено, что тонкая плёнка антимионда индия, температура осаждения которой составляет 430–440 °С, имеет наибольшее значение температурного коэффициента сопротивления. Из плёнок, полученных в установленном интервале температур, были изготовлены опытные образцы тонкоплёночных терморезисторов со следующими характеристиками: номинальное сопротивление  $R_{25} = (804 \pm 0,12)$  Ом; температурный коэффициент сопротивления  $\alpha = (-1,23 \pm 0,02) \%K^{-1}$ ; коэффициент температурной чувствительности  $B = (1090 \pm 20) K$ .

**Ключевые слова:** антимионд индия; тонкие плёнки; взрывное испарение; терморезистор.

## STRUCTURE AND THERMALRESISTANT PROPERTIES OF INDIA ANTIMONIDE FILMS OBTAINED BY EXPLOSIVE THERMAL EVAPORATION

**E. A. Kolesnikova<sup>1</sup>, V. V. Uglov<sup>1</sup>, A. P. Drapezo<sup>2</sup>, A. K. Kuleshov<sup>1</sup>, D. P. Rusalsky<sup>1</sup>**

---

<sup>1)</sup> *Belarusian State University, Independence Ave., 4, 220030 Minsk, Belarus*

<sup>2)</sup> *ООО "Scientific and technical center Vist group sensor", st. Novatorskaya, 2B, 220053, Minsk, Belarus  
Corresponding author: E. A. Kolesnikova (kolesnikova.ar@gmail.com)*

Experimental results of the study of structural changes and thermoresistive properties of indium antimonide films on single-crystal gallium arsenide substrates obtained by explosive thermal evaporation, depending on the deposition temperature. It was found that a thin film of indium antimonide, the deposition temperature of which is 430–440 °C, has the highest value of the temperature coefficient of resistance. From the films obtained in the established temperature range, prototypes of thin-film thermistors with the following characteristics were made: nominal resistance  $R_{25} = (804 \pm 0,12)$  Ом; temperature coefficient of resistance  $\alpha = (-1,23 \pm 0.02) \%K^{-1}$ ; temperature sensitivity coefficient  $B = (1090 \pm 20)$  К.

**Key words:** indium antimonide; thin films; explosive evaporation; thermistor.

## ВВЕДЕНИЕ

Антимонид индия (InSb) полупроводниковое соединение типа  $A^{III}B^V$  с рекордно высокой подвижностью электронов. На основе этого материала изготавливают широкий класс микроэлектронных приборов, для создания которых необходимо получение плёночных структур антимонида индия с использованием методов вакуумного осаждения.

В современной микроэлектронике миниатюризация компонент и элементов различных устройств, в том числе и на основе антимонида индия, выходит на первый план по отношению к монокристаллическим «большим» устройствам. Современные методы эпитаксиального роста позволяют придавать плёночным структурам, осажденным на полированные кристаллические пластины, свойства монокристаллов. Применение таких плёночных структур даёт возможность создания современных устройств микронных размеров. Вследствие этого исследование тонких плёнок антимонида индия, осаждаемых на кристаллические пластины, имеет большой практический интерес, в первую очередь для производства миниатюрных высокочувствительных датчиков Холла, которые могут применяться для датчиков угла поворота, точного наведения цифровых камер, контроля перемещения подвижных элементов сканеров, в том числе и в космической аппаратуре.

Тонкие плёнки антимонида индия являются перспективным материалом для изготовления терморезисторов и датчиков на их основе, поскольку они имеют большое значение подвижности электронов вблизи комнатной температуры. Именно с этим связано очень большое изменение удельного сопротивления плёнок с ростом температуры.

Целью данной работы является нахождение оптимального температурного режима роста плёнок антимонида индия методом взрывного термического испарения на подложке из монокристаллического арсенида галлия, с целью создания плёночных структур для дальнейшего практического применения в конструкциях датчика угла поворота и терморезисторов.

## МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

В данном исследовании применялся метод взрывного термического испарения. Данный метод основан на испарении в вакууме порошков, подаваемых на испаритель, нагретый до температуры, позволяющей за миллисекунды переводить кристаллические частицы в пар [1, 2].

Ранее исследовалось влияние температуры осаждения на электрические свойства плёнок антимонида индия в интервале 350–420 °C. Было установлено, что при температуре осаждения 375 °C формируется гетероэпитаксиальная плёнка антимонида

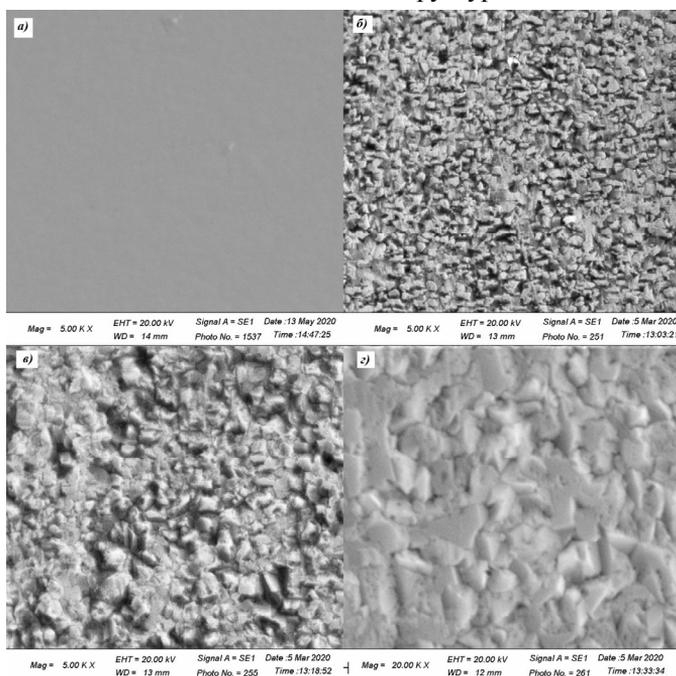
индия с высокими значениями концентрации и подвижности носителей [2]. Известно, что монокристалл InSb обладает достаточно большим значением температурного коэффициента сопротивления в области температур более 200 К. Для повышения температурного коэффициента сопротивления необходимо достичь оптимального соотношения концентрации и подвижности носителей.

Увеличение температуры взрывного осаждения InSb по отношению к температуре совершенной эпитаксиальной структуры InSb может позволить изменить соотношение концентрации индия и сурьмы в соединении в сторону формирования твердого или «дефектного» антимонида индия, обедненного сурьмой за счет её высокой летучести в вакууме. Это в свою очередь может позволить изменять соотношение концентрации и подвижности носителей в формируемых тонких плёнках.

В данной работе были исследованы пять образцов, температура осаждения которых составляла 375–480 °С. Толщина всех образцов составляла 2 мкм. Изучение структуры проводилось с помощью сканирующей электронной микроскопии (СЭМ) и рентгеноструктурного анализа (РСА).

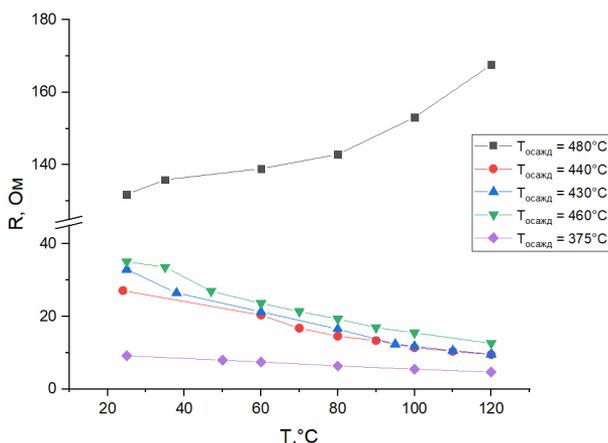
## РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЯ

На SEM изображение поверхности образца (рисунок 1), температура осаждения которого 375 °С, показано, что морфология поверхности полностью однородна. С увеличением температуры осаждения наблюдаются изменения структуры тонких плёнок.



**Рисунок 1. – SEM изображение поверхности образца, полученного при температуре: а – 375 °С, б – 430 °С, в – 440 °С, з – 460 °С**

Так, рентгеноструктурный анализ тонких плёнок показал, что с ростом температуры осаждения в интервале 430–440 °С увеличивается объёмная доля кристаллитов с ориентациями отличными от (400). Плёнка, температура осаждения которой составляла 460 °С, представляет собой поликристаллическую плёнку InSb с присутст-



**Рисунок 2. – Температурная зависимость сопротивления плёнок антимонида индия, полученных при различной температуре осаждения**

ной зависимости сопротивления видно, что для образца, температура осаждения которого составляет 480 °С, наблюдается увеличение сопротивления с ростом температуры. Для остальных образцов наблюдается зависимость сопротивления от температуры свойственная всем полупроводниковым материалам: с ростом температуры сопротивление убывает. Ещё одной важной характеристикой терморезисторов является температурный коэффициент сопротивления, который представляет собой относительное изменение электрического сопротивления при изменении температуры на единицу. Тем больше данный коэффициент для плёнки, тем больше измениться электрическое сопротивление прибора даже при небольшом изменении температуры. В таблице представлены электрофизические характеристики тонких плёнок антимонида индия, такие как номинальное сопротивление, температурный коэффициент сопротивления, удельная проводимость, концентрация и подвижность носителей.

*Таблица*

**Электрофизические характеристики плёнок антимонида индия**

№	$T_{\text{осажд.}}$ , °C	$R_{25}$ , Ом	$\alpha$ , %K <sup>-1</sup>	$\sigma$ , (1/Ом·м)	$n$ , 1/см <sup>3</sup>	$\mu$ , см <sup>2</sup> /(В·с)
1	375	9,2	-0,74	29542,1	$8,48 \times 10^{16}$	21753,7
2	430	33,0	-1,25	11235,9	$5,55 \times 10^{16}$	12640,5
3	440	27,1	-0,93	12578,6	$6,63 \times 10^{16}$	11835,3
4	460	35,1	-1,06	8474,6	$5,35 \times 10^{16}$	9880,6
5	480	131,9	0,27	1378,4	$1,83 \times 10^{18}$	46,9

Таким образом, тонкая плёнка антимонида индия, температура осаждения которой составляет 430 °С, по своим свойствам наиболее удовлетворяет для применения её в качестве терморезистивного датчика.

вием отдельной фазы индия. При температуре осаждения больше 460 °С наблюдается деградация материала и образование, так называемой, островковой плёнки.

Основной характеристикой терморезисторов является температурная зависимость сопротивления, в значительной мере которая определяет остальные характеристики таких изделий. График зависимости сопротивления от температуры для пленок антимонида индия, полученных при различной температуре осаждения, представлены на рисунке 2.

Из полученной температурной

Для проверки работоспособности данной плёнки в составе микросхемы был изготовлен опытный образец тонкоплёночного терморезистора.

Тонкоплёночный терморезистор представляет собой подложку из тонкой плёнки InSb в виде дорожки, так называемой меандром, для увеличения номинального сопротивления. Такой датчик служит для измерения температуры, регистрируя изменения сопротивления.

Для данного терморезистора была получена температурная зависимость сопротивления в интервале от  $-82\text{ }^{\circ}\text{C}$  до  $150\text{ }^{\circ}\text{C}$ , а также было измерено сопротивление при температуре жидкого азота. Результаты измерения сопротивления с ростом температуры представлены на рисунке 3.

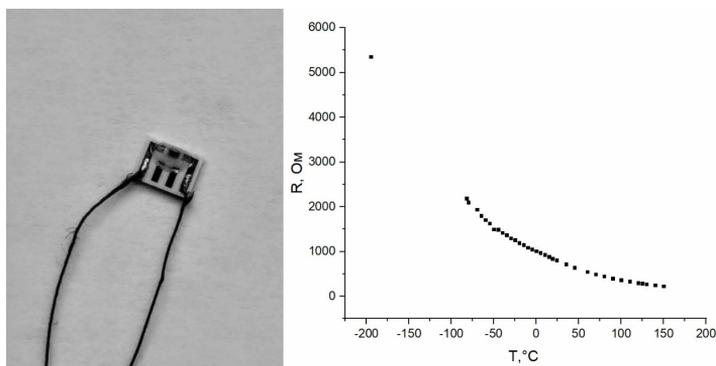


Рисунок 3. – Внешний вид и температурная зависимость сопротивления опытного образца терморезистора

На основании данной температурной зависимости сопротивления были рассчитаны основные характеристики терморезистора. Так, температурный коэффициент сопротивления опытного образца составил  $\alpha = (-1,23 \pm 0,02)\text{ } \%K^{-1}$ , а коэффициент температурной чувствительности  $B = (1090 \pm 20)\text{ } K$ . Номинальное сопротивление опытного образца  $R_{25} = (804 \pm 0,12)\text{ }\Omega$ . Также было получено значение ширины запрещённой зоны тонкой плёнки антимонида индия, которое составило  $\Delta E_g = 0,19\text{ }\text{эВ}$ , при комнатной температуре. Для монокристалла антимонида индия ширина запрещённой зоны при комнатной температуре составляет  $\Delta E_g = 0,17\text{ }\text{эВ}$  [3]. Вероятно, данное различие связано с существованием барьеров, наличие которых связано с увеличением концентрации границ зёрен в получаемой тонкой плёнке.

### ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В результате исследований с помощью PCA, СЭМ и измерений сопротивления с ростом температуры тонких плёнок InSb на монокристаллических подложках GaAs, осаждённых при температуре  $375\text{--}480\text{ }^{\circ}\text{C}$  методом взрывного термического испарения, установлено, что наилучшими терморезистивными свойствами обладает поликристаллическая плёнка, температура осаждения которой  $430\text{ }^{\circ}\text{C}$ . Изготовленный из такой плёнки опытный образец тонкоплёночного терморезистора в виде меандра показал свою работоспособность в области как низких, так и высоких температур. Характеристики полученного терморезистора следующие: номинальное сопротивление  $R_{25} = (804 \pm 0,12)\text{ }\Omega$ ; температурный коэффициент сопротивления

$\alpha = (-1,23 \pm 0,02) \%K^{-1}$ ; коэффициент температурной чувствительности  
 $B = (1090 \pm 20) K$ .

Работа выполнена в рамках программы союзного государства «Технология-СГ» задание 2.3.2.2.

#### БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЕ ССЫЛКИ

1. Технология тонких пленок. Справочник. Под ред. Л. Майссела, Р. Глэнга. Том 1. М.: Советское радио. 1977.
2. Влияние ориентации кристаллитов на электрические свойства плёнок антимонида индия (InSb) на подложках из арсенида галлия (GaAs), полученных методом взрывного термического испарения / В.В. Углов, А.П. Драпеза, Е.А. Колесникова, А.К. Кулешов, Д.П. Русальский // Прикладные проблемы оптики, информатики, радиофизики и физики конденсированного состояния, матер. V междунар. науч.-практ. конф., Минск, 16-17 мая 2019 г.. – М-во образования РБ, НИУ «Ин-т прикладных физических проблем им. А.Н.Севченко» – Минск, 2019 –С. 267–269.
3. Michael S Shur. Handbook Series on Semiconductor Parameters - Volume 1: Si, Ge, C (Diamond), Gaas, Gap, Gasb, Inas, Inp, Insb / Michael S Shur, Gennady Sh Gildenblat, Yu A Goldberg. – 1999.

### ДОМИНИРУЮЩИЕ МЕХАНИЗМЫ ТОКОВ УТЕЧКИ ЭЛЕКТРОРЕОЛОГИЧЕСКОЙ ЖИДКОСТИ С НАНОКРИСТАЛЛИЧЕСКИМ ОРТОФОСФАТОМ АЛЮМИНИЯ

**Е. В. Коробко, З. А. Новикова**

---

*Институт тепло-и массообмена имени А.В. Лыкова НАН Беларуси, Минск, Беларусь,  
e-mail: evkorobko@gmail.com*

Определены механизмы токов утечки в электрореологической жидкости при различных температурных воздействиях в сильном электрическом поле. Выявлены такие механизмы проводимости как термоэлектронная ионизация, ударная ионизация, эмиссия Шоттки, полевая эмиссия с ловушек и др.

**Ключевые слова:** электрореологическая жидкость; ток утечки; механизмы проводимости.

### DOMINANT MECHANISMS OF LEAKAGE CURRENTS OF ELECTRORHEOLOGICAL FLUIDS WITH NANOCRYSTALLIC ALUMINUM ORTHOPHOSPHATE

**E. V. Korobko, Z. A. Novikova**

---

*Laboratory of Rheophysics and Macrokinetics, A. V. Luikov Heat and Mass Transfer Institute,  
National Academy of Sciences of Belarus, Minsk, Belarus  
Corresponding author: E. V. Korobko (evkorobko@gmail.com)*

The mechanisms of leakage currents of electrorheological fluid under various temperature effects in a strong electric field are determined. Such conduction mechanisms as thermionic ionization, impact ionization, Schottky emission, field emission from traps, etc. have been revealed.

**Key words:** electrorheological fluid; leakage current; conduction mechanisms.