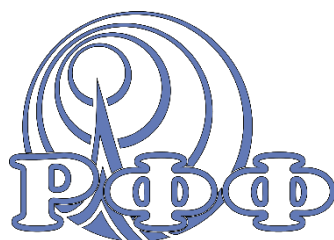


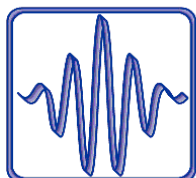


Национальный
исследовательский

**Томский
государственный
университет**



Радиофизический факультет



9-я Международная научно-практическая конференция
**Актуальные проблемы радиофизики
АПР-2021**

Сборник трудов конференции

при поддержке:



20-22 октября 2021 года
г. Томск

Исследование электрических свойств пленок Ga_2O_3 и Cr_2O_3 со структурой корунда и гетероструктуры на их основе

Алмаев Дмитрий Александрович

Кушнарев Богдан Олегович, Алмаев Алексей Викторович

Национальный исследовательский Томский государственный университет

E-mail: almaev001@mail.ru

Оксид галлия является бинарным полупроводниковым соединением, которое может кристаллизоваться в пяти полиформах: α , β , γ , δ и ϵ [1]. Ширина запрещенной зоны Ga_2O_3 зависит от полиморфной фазы и изменяется в пределах от 4.5 до 5.3 эВ [2]. Полиморфизм влияет на многие другие свойства материала. В силу фундаментальных свойств Ga_2O_3 , достичь дырочный тип проводимости в этом материале и создать анизотипные гомопереходы не удалось, что ограничивает разработку перспективных приборов силовой электроники. Интерес представляет исследование анизотипных гетеропереходов на основе Ga_2O_3 . Использовать β - Ga_2O_3 для этой цели не представляется возможным по причине отсутствия полупроводниковых соединений, обладающих p -типом проводимости и имеющих моноклинную структуру, этого нельзя сказать об α - Ga_2O_3 со структурой корунда. Кроме этого, существует множество материалов со схожими параметрами кристаллической решетки: α - In_2O_3 , α - Fe_2O_3 и α - Cr_2O_3 . Самым оптимальным по соотношению параметров кристаллической решетки и доступности считается α - Cr_2O_3 , который представляет металлооксидный полупроводник p -типа проводимости, с шириной запрещенной зоны $E_g = 2.9 - 3.3$ эВ [3]. Данная работа посвящена исследованию электропроводящих свойств оксидов галлия и хрома со структурой корунда и гетероструктуры на основе этой пары полупроводников.

Пленки α - Ga_2O_3 были выращены ООО «Совершенные кристаллы» методом хлорид паровозной эпитаксии (HVPE), используя хлорид галлия и кислород в качестве прекурсоров. Рост проходил на планарных сапфировых подложках с ориентацией (0001) и толщиной 330 – 440 мкм. В процессе синтеза образец был легирован оловом, для этого в поток газовой смеси был добавлен хлорид олова. Время и температура роста пленок составляли 40 минут и 500°C соответственно. Толщина пленок α - Ga_2O_3 :Sn составляла 2 мкм. Концентрация легирующей примеси $N_d \approx 1.7 \times 10^{18} \text{ см}^{-3}$.

Тонкие пленки Cr_2O_3 были получены методом ВЧ магнетронного распыления мишени хрома (99.97%) в кислородно-аргоновой плазме. В качестве подложки использовали сапфировую пластину, аналогичную описанной выше. При напылении пленок, температура подложки поддерживалась на уровне комнатной. Рабочее давление и мощность установки составляли $7 \cdot 10^{-3}$ мбар и 70 В, соответственно. Расстояние между подложкой и мишенью – 70 мм. После напыления, пленку подвергали отжигу в атмосфере воздуха при температуре 673 К в течение 3 часов. Толщина пленки Cr_2O_3 составляла 120 – 150 нм.

Для измерения электропроводящих свойств на поверхности пленок α - Ga_2O_3 :Sn и α - Cr_2O_3 формировались контакты Ti/Au, расстояние между которыми составляет 1 мм. Известно, что такой тип контакта для α - Ga_2O_3 является омическим [4]. Из литературных данных [5] известно, что α - Cr_2O_3 обладает собственной дырочной проводимостью, обусловленной вакансиями металла. Поэтому, согласно зонной теории полупроводников ожидалось, что Ti/Au будет формировать омический контакт к α - Cr_2O_3 .

Гетероструктура была сформирована следующим образом: на половину сапфировой пластинки с предварительно выращенным α - Ga_2O_3 :Sn напыляли при помощи магнетрона слой α - Cr_2O_3 толщиной 450 – 550 нм, затем совмещали полученную структуру с точечным шаблоном – маской для нанесения контактов Ti/Au, расстояние между контактами 1.8 мм. Схема созданной гетероструктуры показана на рисунке 1.

Измерение вольт-амперных характеристик (ВАХ) структур для различных температур осуществлялось при помощи источника – измерителя Keithley 2636A и микронзондовой установки Nixtron. Процесс измерений был автоматизирован при помощи программы, разработанной в среде Lab View. Точность задаваемой температуры составляла $\pm 0.1^\circ\text{C}$. Измерения проводились в темновых условиях. Схема измерительной установки показана на рисунке 2.

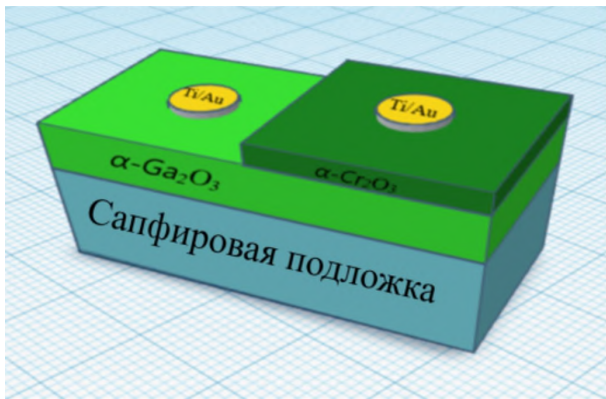


Рис.1 Схематическое изображение гетероструктуры



Рис.2 Схема измерительной установки для исследования ВАХ образцов

Во избежание трансформации $\alpha\text{-Ga}_2\text{O}_3$ в $\beta\text{-Ga}_2\text{O}_3$, измерения ВАХ образцов проводились в интервале напряжения U от 0 до 100 В, в диапазоне температур T от комнатной до 300°C, а для $\alpha\text{-Cr}_2\text{O}_3$ Ti/Au при $T = 50 \div 450^\circ\text{C}$. Угол наклона ВАХ в двойных логарифмических координатах соответствует 1 в области T от 25 до 200°C для $\alpha\text{-Ga}_2\text{O}_3:\text{Sn}$, а для $\alpha\text{-Cr}_2\text{O}_3$ для всех исследуемых температур. ВАХ пленок $\alpha\text{-Ga}_2\text{O}_3:\text{Sn}$ и $\alpha\text{-Cr}_2\text{O}_3$ с контактами Ti/Au в двойных логарифмических координатах показаны на рисунке 3, где I – ток.

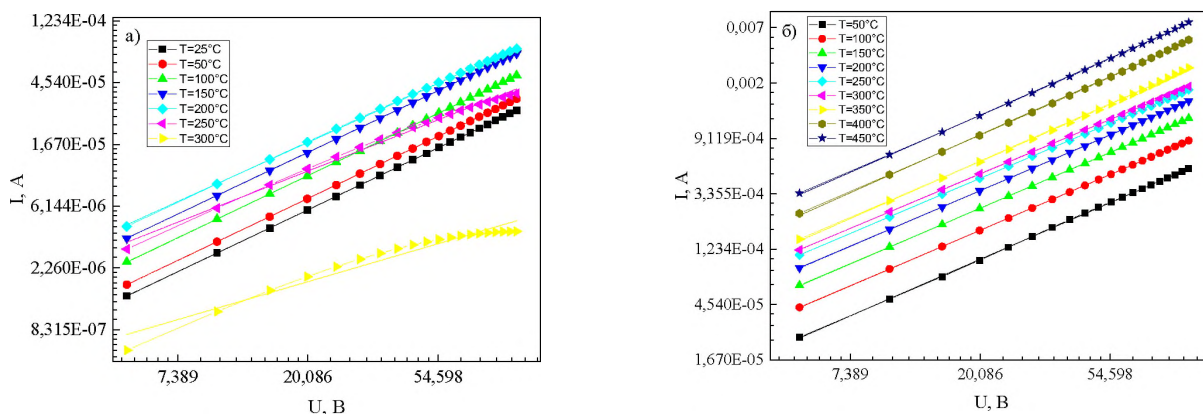


Рис.3 ВАХ $\alpha\text{-Ga}_2\text{O}_3:\text{Sn}$ (а) и $\alpha\text{-Cr}_2\text{O}_3$ (б) с контактами Ti/Au в двойных логарифмических координатах

Так как контакты являются омическими, то при анализе температурных зависимостей дифференциальной проводимости можно оценить энергию активации акцепторных ΔE_a и донорных ΔE_d уровней. Температурная зависимость проводимости легированного полупроводника описывается следующей формулой:

$$G = G_0 \exp\left(-\frac{\Delta E}{2kT}\right), \tag{1}$$

где G – дифференциальная проводимость, $\frac{dI}{dU}$; G_0 – предэкспоненциальный множитель; k – постоянная Больцмана в эВ/К.

На рисунке 4 представлена зависимость $\ln(G)$ от $10^3/T$. По линейным участкам кривых были определены значения ΔE_a и ΔE_d для $\alpha\text{-Ga}_2\text{O}_3:\text{Sn}$ и $\alpha\text{-Cr}_2\text{O}_3$.

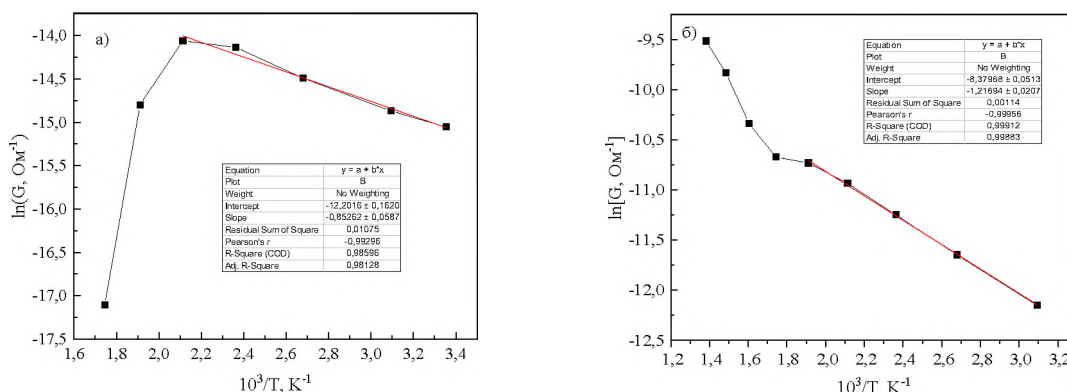


Рис.4 Зависимость $\ln(G)$ от $10^3/T$ для $\alpha\text{-Ga}_2\text{O}_3:\text{Sn}$ (а) и $\alpha\text{-Cr}_2\text{O}_3$ (б)

Полученные значения энергий активации составили 0.15 ± 0.01 эВ для оксида галлия и 0.209 ± 0.004 эВ для оксида хрома. Эти значения можно связать с донорной примесью олова в $\alpha\text{-Ga}_2\text{O}_3$ и собственными дефектами в $\alpha\text{-Cr}_2\text{O}_3$.

ВАХ гетероструктуры $\alpha\text{-Ga}_2\text{O}_3:\text{Sn}/\alpha\text{-Cr}_2\text{O}_3$ (рис. 5) в диапазоне U от 0 до 200 В и в интервале T от 25 до 300°C имеют симметричный вид и с ростом напряжения изменяются по степенному закону.

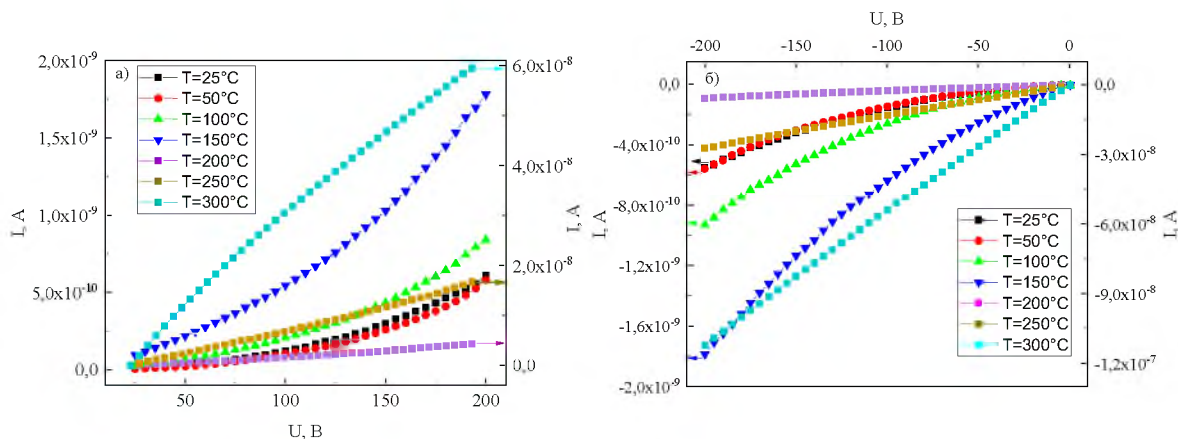


Рис.5 Прямые (а) и обратные (б) ВАХ гетероструктуры

ВАХ в диапазоне T от 25 до 450°C для $\alpha\text{-Cr}_2\text{O}_3$ имеют линейную зависимость. Для пленки $\alpha\text{-Ga}_2\text{O}_3:\text{Sn}$ при T выше 200°C наблюдается отклонение от линейности и рост сопротивления. Такое поведение характерно для пленок SnO_2 . Можно предположить, что присутствующее в пленке олово выделяется в виде кристаллитов и образует гетеропереход с зернами $\alpha\text{-Ga}_2\text{O}_3$, что оказывает влияние на механизм проводимости.

Из анализа зависимости проводимости от температуры рассчитали энергию активации. Значения энергии активации для пленок $\alpha\text{-Ga}_2\text{O}_3:\text{Sn}$ и $\alpha\text{-Cr}_2\text{O}_3$ составляют 0.15 ± 0.01 эВ и 0.209 ± 0.004 эВ соответственно. Также были рассмотрены ВАХ гетероструктуры полученной на основе корундообразных $n\text{-Ga}_2\text{O}_3/p\text{-Cr}_2\text{O}_3$. ВАХ при прямом и обратном включении, имеют почти симметричный вид и с ростом напряжения изменяются по степенному закону. Полученная структура $\text{Ti}/\text{Au}/\alpha\text{-Ga}_2\text{O}_3:\text{Sn}/\alpha\text{-Cr}_2\text{O}_3/\text{Au}/\text{Ti}$ является анизотипным и предполагаемо резким гетеропереходом, не проявляющим выпрямительные свойства, что может быть связано с высоким сопротивлением слоев полупроводников.

Список публикаций:

[1] Roy Rustum, Hill V. G. and Osborn E. F. Polymorphism of Ga_2O_3 and the System $\text{Ga}_2\text{O}_3 - \text{H}_2\text{O}$ 1952. – с.719 - 722.
 [2] Pearton S. J., et al.: A review of Ga_2O_3 materials, processing, and devices. // Applied physics reviews – 2008. – 57 с.
 [3] Алмаев А.В., Кушнарев Б.О., Черников Е.В., Новиков В.А. Синтез и газовая чувствительность тонких пленок оксида хрома. Письма в ЖТФ. 2020, том 46, вып.20 – с. 35-37.
 [4] Guo D.Y., Zhao X.L., Zhi Y.S., Cui W., Huang Y.Q., An Y.H., Li P.G., Wu Z.P., Tang W.H. Epitaxial growth and solar-blind photoelectric properties of corundum-structured $\alpha\text{-Ga}_2\text{O}_3$ thin films, Materials Letters, <http://dx.doi.org/10.1016/j.matlet.2015.11.001>
 [5] Cheng, C.-S., Gomi, H., Sakata, H. Electrical and Optical Properties of Cr_2O_3 Films Prepared by Chemical Vapour Deposition. Physica Status Solidi (a), 155(2), 417–425.