

ЛИТЕРАТУРА

1. Величко, О. И. Система уравнений радиационно-стимулированной диффузии ионно-имплантированных примесей: мат. VII всесоюзной конференции "Взаимодействие атомных частиц с твердым телом" / О. И. Величко. Минск: Изд. МРТИ. 1984. Ч. 2. С. 180.
2. Uskov, V. A. Effect of nonuniform vacancy distribution on diffusion of impurities in semiconductors / V. A. Uskov, V. V. Vas'kin // Inorganic Materials. 1972. Vol. 8. No. 10. P. 1617.
3. Morikawa, Ya. Uphill diffusion mechanism in proton-irradiated silicon / Ya. Morikawa, K. Yamamoto, K. Nagami // Appl. Phys. Lett. 1980. Vol. 36. No. 12. P. 997.
4. Strack, H. Ion bombardment of silicon in a glow discharge / H. Strack // J. Appl. Phys. 1963. Vol. 34. No. 8. P. 2405.

ВЛИЯНИЕ ЛЕГИРОВАНИЯ ПЕРЕХОДНЫМИ МЕТАЛЛАМИ НА ДИЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ КРИСТАЛЛОВ TlGaS_2

В. Г. Гуртовой, А. У. Шелег, С. Н. Мустафаева, Э. М. Керимова

ГО «НПЦ НАН Беларуси по материаловедению», iftpranb@physics.by

Кристаллы TlGaS_2 являются представителями большой группы тройных таллиевых халькогенидных соединений типа $\text{TlA}^{\text{III}}\text{B}^{\text{VI}}_2$ ($A = \text{In, Ga}$; $B = \text{S, Se, Te}$). Эти кристаллы имеют ярко выраженную слоистую структуру и представляют собой квазидвумерные системы с интересными физическими свойствами. Слоистая структура, как правило, приводит к проявлению анизотропии ряда физических характеристик и образованию политипных модификаций таких кристаллов, что значительно сказывается на их физических свойствах [1].

Большинство кристаллов этой группы проявляют как полупроводниковые, так и сегнетоэлектрические свойства. У некоторых представителей этого семейства при изменении температуры обнаружены последовательности фазовых переходов (ФП). Обусловленные наличием в них длиннопериодических соизмеримых и несоизмеримых сверхструктур и их преобразованием с изменением температуры [2]. Рентгенографические исследования кристаллов TlGaS_2 [3] показали наличие скачка параметра элементарной ячейки при $T = 127$ К. Следует отметить, что в одной из последних работ [4], в которой приводятся результаты исследования теплоёмкости, в кристалле TlGaS_2 зафиксированы ФП при $T_1 = 177$ К и $T_2 = 241$ К.

Следует отметить, что в литературе имеются значительные расхождения результатов по исследованию свойств кристаллов этого семейства. Такие расхождения могут иметь несколько причин. Во-первых, модулированная сверхструктура очень чувствительна к состоянию образца (структурные дефекты, различные примеси и т.д.), что сказывается на температурах ФП в кристалле. Во-вторых, так как эти кристаллы склонны к политипии, их физические свойства могут различаться. Кроме того, в этих кристаллах может образоваться смесь политипов. Поэтому представляло значительный интерес установить, как влияют примеси определённого сорта на физические характеристики этих кристаллов.

Известно, что легирование соединений приводит к изменению их физических свойств. В [5] показано, что частичное замещение галлия марганцем в монокристаллах TlGaS_2 приводит к увеличению коэффициента рентгеночувствительности. Частичное замещение галлия кобальтом в монокристаллах TlGaS_2 , как показано в [6],

приводит к увеличению электросопротивления и сдвигу края поглощения в область низких энергий.

Целью данной работы было установление закономерностей изменения электропроводности и диэлектрической проницаемости кристаллов TlGaS_2 , легированных переходными элементами, в зависимости от температуры и природы легирующего химического элемента.

Измерения диэлектрической проницаемости (ϵ) и электропроводности (σ) проводили методом плоского конденсатора на монокристаллических пластинках толщиной $\sim 0.7 - 1.5$ мм вдоль кристаллографического направления $[001]$ с помощью цифрового измерителя Е7-20 на частотах измерительного поля $10^3 - 10^6$ Гц в температурном диапазоне 140 - 300 К.

На рисунках 1 и 2 приведены температурные зависимости удельной диэлектрической проницаемости монокристаллов TlGaS_2 и $\text{TlGa}_{0.95}\text{Mn}_{0.05}\text{S}_2$ и $\text{TlGa}_{0.995}\text{Cr}_{0.005}\text{S}_2$ вдоль кристаллографического направления $[001]$ на частотах $10^3 - 10^6$ Гц.

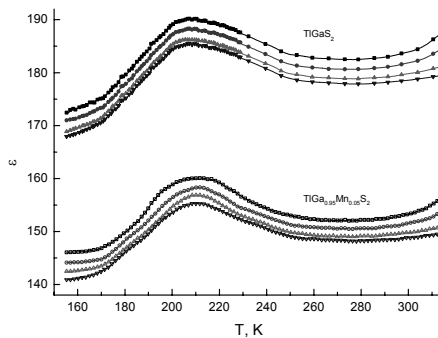


Рис. 1. Температурные зависимости диэлектрической проницаемости монокристаллов TlGaS_2 и $\text{TlGa}_{0.95}\text{Mn}_{0.05}\text{S}_2$

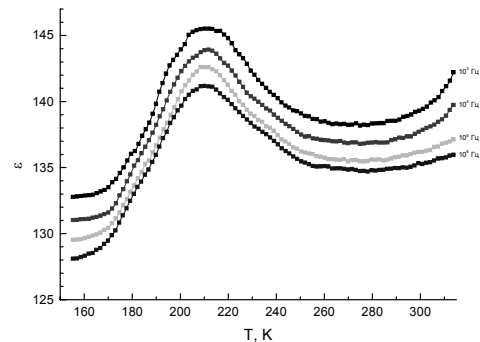


Рис. 2. Температурные зависимости диэлектрической проницаемости монокристаллов $\text{TlGa}_{0.995}\text{Cr}_{0.005}\text{S}_2$

Как видно из рисунков, значения ϵ с ростом температуры увеличиваются. Наблюдается значительная дисперсия диэлектрической проницаемости. С ростом частоты значения ϵ уменьшаются, что обусловлено, как известно, релаксационными процессами, происходящими в высокочастотной области измерений.

На кривых $\epsilon = f(T)$ в области температур $\sim 170 - 240$ К наблюдается широкий максимум. Ранее при исследовании теплоемкости [4] и оптических свойств [5, 6] кристаллов TlGaS_2 было установлено, что в области температур ~ 173 К и ~ 238 К наблюдаются аномалии соответствующих физических свойств. Возможно, в области температур $170 - 240$ К в кристалле TlGaS_2 , как чистом, так и легированном марганцем, существует несоизмеримая фаза, и поэтому наблюдается такой характер температурной зависимости ϵ . Однако, для такого утверждения необходимы детальные исследования особенностей кристаллической структуры этого кристалла в этой области температур.

Как видно из рисунка 1, легирование кристаллов TlGaS_2 марганцем (5 ат. %) приводит к некоторому уменьшению значений диэлектрической проницаемости ($\sim 15\%$), при этом не оказывая заметного влияния на характер температурных зависимостей и фазовых переходов соразмерная-несоразмерная фаза.

На рисунке 3 приведены температурные зависимости удельной электропроводности монокристаллов TlGaS_2 , $\text{TlGa}_{0.995}\text{Cr}_{0.005}\text{S}_2$ и $\text{TlGa}_{0.95}\text{Mn}_{0.05}\text{S}_2$ вдоль кристаллогра-

фического направления [001] на частотах 10^3 - 10^6 Гц. Видно, что значения σ с ростом температуры увеличиваются. Это обусловлено увеличением концентрации свободных носителей зарядов (проявление полупроводниковых свойств) и ростом подвижности доменных границ (проявление сегнетоэлектрических свойств) в результате повышения температуры. Видно, что наблюдается значительная дисперсия проводимости. С ростом частоты проводимость растет, что обусловлено, как известно, релаксационными процессами, происходящими в высокочастотной области измерений. На кривых $\sigma = f(T)$ для исследованных кристаллов в области $T \sim 170$ К наблюдается излом, который возможно обусловлен ФП соразмерная–несоразмерная фаза при этой температуре. На кривых температурной зависимости электропроводности в области высоких температур можно выделить два участка, которые отличаются наклонами и различным механизмом электропроводности.

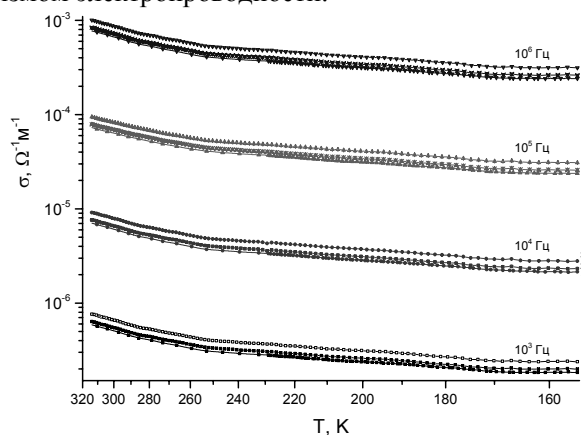


Рис. 3. Температурные зависимости удельной электропроводности монокристаллов (1) – TlGaS_2 , (2) – $\text{TlGa}_{0.995}\text{Cr}_{0.005}\text{S}_2$ и (3) – $\text{TlGa}_{0.95}\text{Mn}_{0.05}\text{S}_2$

Как видно из рисунка, легирование кристаллов TlGaS_2 хромом (0.5 ат. %) и марганцем (5 ат. %) приводит к некоторому увеличению электропроводности ($\sim 11\%$ для $\text{TlGa}_{0.95}\text{Mn}_{0.05}\text{S}_2$), при этом не оказывая заметного влияния на характер температурных зависимостей и ФП соразмерная–несоразмерная фаза.

Таким образом, впервые проведены исследования удельной диэлектрической проницаемости и электропроводности температур монокристаллов TlGaS_2 , $\text{TlGa}_{0.995}\text{Cr}_{0.005}\text{S}_2$ и $\text{TlGa}_{0.95}\text{Mn}_{0.05}\text{S}_2$ в широком интервале. Подтверждено наличие фазовых переходов второго рода соразмерная – несоразмерная фаза в области температур ~ 173 К. Показано, что легирование кристаллов TlGaS_2 хромом (0.5 ат. %) и марганцем (5 ат. %) приводит к некоторому уменьшению значений диэлектрической проницаемости ($\sim 15\%$ для $\text{TlGa}_{0.95}\text{Mn}_{0.05}\text{S}_2$) и увеличению электропроводности ($\sim 11\%$ для $\text{TlGa}_{0.95}\text{Mn}_{0.05}\text{S}_2$), при этом не оказывая заметного влияния на характер температурных зависимостей и фазовых переходов соразмерная–несоразмерная фаза.

ЛИТЕРАТУРА

1. Боровой, Н.А. Влияние политипии на структурные фазовые превращения в кристаллах TlGaSe_2 / Н.А. Боровой [и др.] // Физика твердого тела. 2009. Т. 51. №11. С. 2229.

2. *McMorrow, D.F.* The structure of the paraelectric and incommensurate phases of TiGaSe_2 / D.F. McMorrow [и др.] // *Journal of Physics: Condensed Matter*. 1990. V. 2. N 16. P. 3699.
3. *Мальсагов, А.У.* Рентгенографическое исследование соединений TlInS_2 , TiGaS_2 и твердых растворов $\text{Tl}_{0.98}\text{Cu}_{0.02}\text{InS}_2$, $\text{Tl}_{0.98}\text{Ag}_{0.02}\text{GaS}_2$ при 93-293 К / А.У. Мальсагов, Б.С. Кульбужиев, Б.М. Хамхоев // *Неорганические материалы*. 1989. Т. 25. №2. С. 216.
4. *Açikgöz, M.* Heat Capacity Anomalies of TlInS_2 and TiGaS_2 Single Crystals Detected by Differential Scanning Calorimetry (DSC) / M. Açikgöz // *Turkish Journal of Physics*. 2008. P. 32. P. 145.
5. *Мустафаева, С.Н.* Фотоэлектрические и рентгенодозиметрические свойства монокристаллов $\text{TiGa}_{0.97}\text{Mn}_{0.03}\text{S}_2$ / С.Н. Мустафаева // *Неорганические материалы*. 2009. Т. 45. №6. С. 659.
6. *Karabulut, O.* Electrical and optical properties of Co doped TiGaS_2 crystals / O. Karabulut, K. Yilmaz, B. Boz // *Crystal Research and Technology*. 2011. V. 46. N 1. P. 79.

ИССЛЕДОВАНИЕ ЗАКОНОМЕРНОСТЕЙ ФОРМИРОВАНИЯ ДЕФЕКТОВ В МОНОКРИСТАЛЛАХ СИНТЕТИЧЕСКОГО АЛМАЗА ПРИ ОБЛУЧЕНИИ УСКОРЕННЫМИ ЭЛЕКТРОНАМИ И ОТЖИГЕ

Г. А. Гусаков¹, А. В. Мудрый²

¹*НИИ прикладных физических проблем им. А.Н.Севченко БГУ, gga68@rambler.ru*

²*Научно-практический центр НАН Беларуси по материаловедению*

Последнее десятилетие радиационным дефектам в алмаза уделяется повышенное внимание. Прежде всего, это относится к центру $(\text{N-V})^-$, который в настоящее время рассматривается как базовый элемент будущего квантового процессора, необходимого для создания квантового компьютера, линий связи с квантовым протоколом безопасности и других применений спинтроники [1].

В экспериментах использовались монокристаллы синтетического алмаза, выращенные методом температурного градиента [2] в системе металла-катализатора Ni-Fe-C. Содержание фоновых примесей в исследованных образцах варьировалось в диапазоне $(1...3) \times 10^{19}$ атомов/см³. Облучение электронами с энергией 6 МэВ производилось на линейном ускорителе УЭЛВ-10-10. Интенсивность облучения составляла $\sim 5 \times 10^{12}$ эл·см⁻²·с⁻¹. Доза облучения варьировалась в интервале от 2×10^{17} до $1,5 \times 10^{18}$ эл·см⁻². Образцы крепились в специальном охлаждаемом держателе. Разогрев образцов не превышал 150°C. Термообработка облученных кристаллов производилась в вакууме в температурном интервале от 300 до 1700°C. Дефектно-примесный состав кристаллов алмаза контролировался при помощи методов поглощения света в диапазоне длин волн 0,2-25 мкм и фотолюминесценции.

Исходные кристаллы алмаза относились к типу Ib, т.е. содержали примесь азота преимущественно в форме одиночных атомов в положении замещения (С-дефекты). Типичный спектр поглощения в видимой области исходного кристалла синтетического алмаза приведены на рисунке 1 (спектр 1). Облучение синтетических алмазов ускоренными электронами приводит к возникновению в спектрах поглощения света широкой полосы 620 нм с бесфононной линией 741 нм, интенсивность которой увеличивается с ростом дозы облучения. Данная полоса соответствует центру GR1 (вакансия в нейтральном состоянии). Наблюдается также и некоторый сдвиг «вторичного» края поглощения в красную область. Сдвиг «вторичного» края поглощения в красную область, по-видимому, вызван образованием центров ND1 (вакансия в отрицательно заряженном состоянии).