

Глубокие центры на границе раздела в гетероструктурах $\text{In}_{2x}\text{Ga}_{2(1-x)}\text{Te}_3/\text{InAs}$ и $\text{In}_2\text{Te}_3/\text{InAs}$

© Э.П. Домашевская[‡], Е.А. Михайлюк⁺, Т.В. Прокопова^{*}, Н.Н. Безрядин[‡]

⁺ Старооскольский технологический институт им. А.А. Угарова (филиал)
Национального исследовательского технологического университета МИСиС,
309500 Старый Оскол, Россия

^{*} Военно-воздушная академия им. профессора Н.Е. Жуковского и Ю.А. Гагарина,
394064 Воронеж, Россия

[‡] Воронежский государственный университет,
394064 Воронеж, Россия

E-mail: gazon1978@yandex.ru

(Получена 9 июля 2015 г. Принята к печати 16 июля 2015 г.)

Методами адмиттанса, вольт-амперных и вольт-фарадных характеристик изучены гетероструктуры $\text{In}_{2x}\text{Ga}_{2(1-x)}\text{Te}_3/\text{InAs}$ и $\text{In}_2\text{Te}_3/\text{InAs}$, полученные технологиями квазизамкнутого объема и напыления. Установлен спектр распределения локальных энергетических уровней на границе раздела. Методом адмиттанса обнаружен новый акцепторный центр с энергией 0.36 эВ наряду с известным донором с энергией 0.5 эВ. Концентрация акцепторных центров N_t зависит от способа получения и технологических режимов. Кинетика генерационно-рекомбинационных процессов в интервале температур 70–400 К не влияет на изолирующие свойства диэлектрического слоя In_2Te_3 или $\text{In}_{2x}\text{Ga}_{2(1-x)}\text{Te}_3$ ($x \approx 0.65$), поэтому показана возможность использования их в качестве гетероструктур полевых транзисторов.

1. Введение

Создание оптоэлектронных и микроэлектронных приборов на основе полупроводниковых соединений группы $\text{A}^{\text{III}}\text{B}^{\text{V}}$ весьма актуально ввиду значительного расширения функциональных возможностей этих приборов. В 1974 г. в работах Б.И. Сысоева и В.Ф. Сыророва было предложено важное решение для совершенствования работы кремниевых МДП систем (металл–диэлектрик–полупроводник) [1–3]. Однако существенной трудностью при реализации такого технического решения для соединений класса $\text{A}^{\text{III}}\text{B}^{\text{V}}$ является проблема поиска новых типов подзатворных слоев для полевых элементов интегральных схем (ИС) [4–6]. Поэтому в данной работе комплексно исследуются полупроводниковые соединения группы $\text{A}_2^{\text{III}}\text{B}_3^{\text{VI}}$ ограниченной толщины d [7] в качестве слоев P' в структурах МП'П (металл–полупроводник–полупроводник) на предмет образования глубоких центров на границе раздела П'П.

2. Образцы и методы исследования

Наиболее полно сумме требований [8–10] могут удовлетворять соединения типа $\text{A}_2^{\text{III}}\text{B}_3^{\text{VI}}$ (In_2Te_3) [11–13]. Эти материалы обладают высокой радиационной стойкостью, что обусловлено рыхлостью кристаллической структуры [12,13]. Соединения этого класса имеют кубическую структуру типа сфалерит, подобную структуре типа алмаза кремниевой решетки и структуре типа сфалерит соединений класса $\text{A}^{\text{III}}\text{B}^{\text{V}}$ (InAs) [14,15]. Однако хорошее соответствие параметров кристаллических решеток (a_0) InAs и In_2Te_3 может быть реализовано в качественной

границе раздела только при высокой степени монокристалличности получаемого слоя In_2Te_3 . Слои теллуридов индия толщиной $d = 0.1–1.5$ мкм получали методом квазизамкнутого объема (КЗО), технологиями гетероэпитаксиального замещения (ГВЗ) и напыления из независимых источников [16–18]. Установлено, что граница раздела в гетероструктуре $\text{In}_2\text{Te}_3/\text{InAs}$, полученной ГВЗ, имеет существенные структурные нарушения. При получении гетероструктур $\text{In}_2\text{Te}_3/\text{InAs}$ и $\text{In}_{2x}\text{Ga}_{2(1-x)}\text{Te}_3/\text{InAs}$ ($x \approx 0.65$) методом напыления из независимых источников граница раздела более однородная и не содержит видимых микродефектов.

Исследования электрофизических свойств слоев проводились методами измерений температурной зависимости дифференциальной проводимости, вольт-амперных (ВАХ) и вольт-фарадных (ВФХ) характеристик в диапазонах частот тестового сигнала $f = 10^3–10^6$ Гц, температур $T = 70–400$ К [19–21].

3. Обсуждение результатов

В работе [22] приведены результаты исследования механизма токопрохождения в гетероструктурах $\text{In}_2\text{Te}_3/\text{InAs}$, полученных по технологии гетероэпитаксиального замещения и напыления из независимых источников [16,23–25], и $\text{In}_{2x}\text{Ga}_{2(1-x)}\text{Te}_3/\text{InAs}$ ($x \approx 0.65$), полученных напылением из независимых источников [26]. Анализ ВАХ позволяет определить механизм токопрохождения в исследованных гетероструктурах: при отрицательном прикладываемом напряжении он соответствует модели токопрохождения, ограниченного пространственным зарядом (ТОПЗ), при положительном напря-

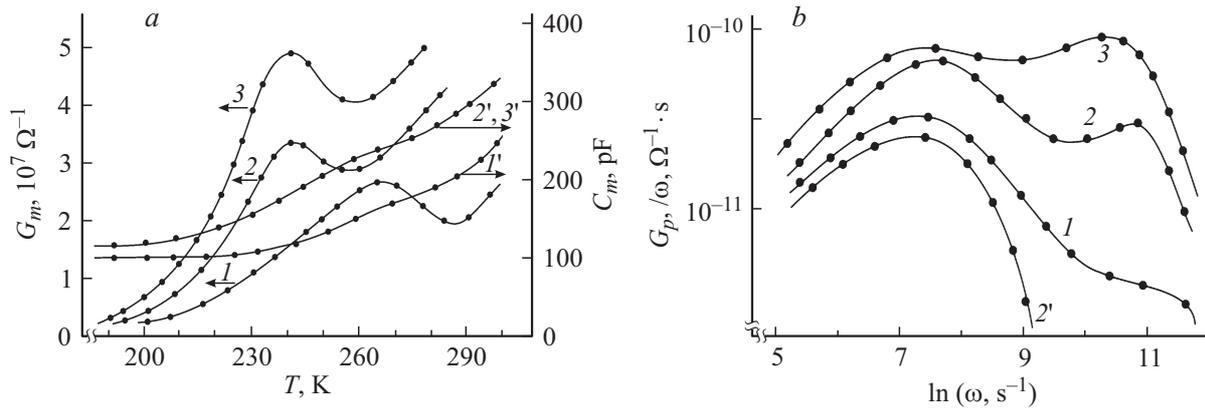


Рис. 1. *a* — температурные зависимости дифференциальной проводимости (I – 3), емкости (I' – $3'$) для гетеропереходов $\text{In}_2\text{Te}_3/\text{InAs}$, полученных ГВЗ (I , I'), напылением (2 , $2'$), и гетеропереходов $\text{In}_{2-x}\text{Ga}_{2(1-x)}\text{Te}_3/\text{InAs}$ ($x \approx 0.65$) (3 , $3'$); $f = 2$ кГц. *b* — зависимости $G_p(\omega)/\omega$ для гетеропереходов $\text{In}_2\text{Te}_3/\text{InAs}$, полученных ГВЗ (I) и $\text{In}_{2-x}\text{Ga}_{2(1-x)}\text{Te}_3/\text{InAs}$ ($x \approx 0.65$) при $T \approx 245$ (3) и 250 К ($2'$).

жении — механизму Пула–Френкеля. Дополнительный анализ температурных зависимостей тока $I(T)$ показал, что для всех исследуемых гетероструктур наклон зависимости $\lg I$ от $10^3/T$, отвечающий $(1/2)\Delta E_g$ (ΔE_g — ширина запрещенной зоны), проявляется уже при температурах 250–300 К. При более низких температурах величина энергии активации уменьшается и становится заметно меньше половины запрещенной зоны.

С целью выявления этих особенностей в слоях In_2Te_3 методом температурной зависимости дифференциальной проводимости и емкости в работе [27] определялись параметры центров локализации заряда (ЦЛЗ) в запрещенной зоне теллурида индия. Расчет значений нормированной проводимости $G_p(\omega)/\omega$ (рис. 1, *b*) проводился по экспериментальным температурным зависимостям проводимости, $G_m(T)$, и емкости, $C_m(T)$ (рис. 1, *a*). Установлено, что на зависимостях $G_p(\omega)/\omega$ имеются два максимума: первый при частоте $f = 200$ Гц для пленок In_2Te_3 и $\text{In}_{2-x}\text{Ga}_{2(1-x)}\text{Te}_3$, второй при $f = 2$ кГц для $\text{In}_{2-x}\text{Ga}_{2(1-x)}\text{Te}_3$ и $f = 4.6$ кГц для In_2Te_3 [22]. Характерно, что в слоях In_2Te_3 второй максимум на зависимости $G_p(\omega)/\omega$ вырождается в полку и по уровню проводимости становится на порядок величины меньше амплитуды соответствующих пиков, полученных в гетероструктурах с напыленными пленками (рис. 1, *b*, кривая I).

Особенность существования двух максимумов зависимости $G_p(\omega)/\omega$, в отличие от одного на зависимости $G_m(T)$, свидетельствует, во-первых, о присутствии двух энергетических уровней в запрещенной зоне исследуемых слоев теллуридов, а во-вторых, о различии частотных факторов центров, обуславливающих эти уровни. Проявление только одного максимума зависимости $G_m(T)$ можно объяснить наложением сквозного тока дифференциальной проводимости и частот тестового сигнала при температурах > 260 К в структурах с напыленными пленками и, возможно, низким значением концентрации центров с меньшей энергией активации в

пленках, полученных методом ГВЗ. Последнее предположение можно связать с кривой I на рис. 1, *b*, так как на ней отсутствует выраженный пик в области более высоких частот ($f \approx 3$ кГц, $\ln \omega \approx 10.5$). Аналогичный максимум не появляется и в структурах, полученных методом напыления, при $T > 250$ К (рис. 1, *b*, кривая $2'$). Это указывает на его принадлежность центру с меньшей энергией активации, $\Delta E \approx 0.36$ эВ. Это значение рассчитывается из зависимости $G_m(T)$ в пленках In_2Te_3 и $\text{In}_{2-x}\text{Ga}_{2(1-x)}\text{Te}_3$ ($x \approx 0.65$), полученных методом напыления. Пик на зависимостях тестового сигнала $G_p(\omega)/\omega$ (рис. 1, *b*) в области низких частот ($f \approx 200$ Гц, $\ln \omega \approx 7.2$) существует вплоть до $T \approx 350$ К. Определить энергию активации $\Delta E \approx 0.5$ эВ [28] центров, ответственных за этот максимум, по температурным зависимостям $G_m(T)$ удалось только для пленок, полученных ГВЗ [29]. Совпадение энергии со значениями, определенными из температурных зависимостей тока этих же гетероструктур [22], позволяет связать токопрохождение в слое при положительном потенциале на Al-контакте (механизм Пула–Френкеля) с токопроходом при отрицательном потенциале на Al-контакте (ТОПЗ). Максимум на зависимостях $G_p(\omega)/\omega$ при частоте тестового сигнала $f \approx 200$ Гц связан с параметрами центров донорного типа, а при $f \approx 3$ кГц отвечает в большей степени характеру поведения нейтральной ловушки [27].

В работе [27,30] методом адмиттанса установлен характер распределения центров по толщине слоя пленок In_2Te_3 и $\text{In}_{2-x}\text{Ga}_{2(1-x)}\text{Te}_3$. Для донорного уровня с энергией ~ 0.5 эВ значение концентрации в пленке In_2Te_3 или $\text{In}_{2-x}\text{Ga}_{2(1-x)}\text{Te}_3$ составляет $N_d \sim 10^{15} \text{ см}^{-3}$, в зависимости от метода их получения, и не зависит от приложенного внешнего напряжения. Для уровня с энергией ~ 0.36 эВ значения концентрации ловушечного уровня N_l в структурах, полученных различными способами, имеют большой разброс: $N_l \sim 10^{13} - 10^{15} \text{ см}^{-3}$. При этом в пленке In_2Te_3 , полученной ГВЗ, нет зависи-

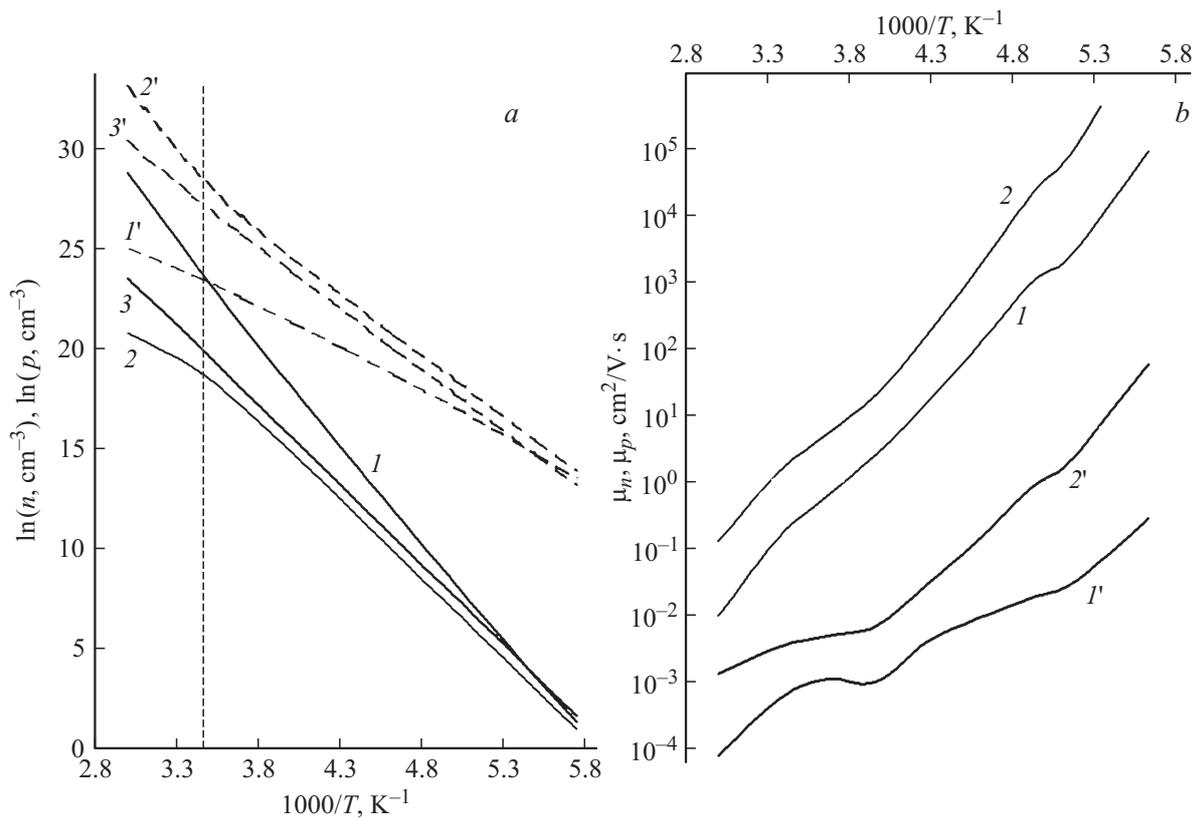


Рис. 2. *a* — температурные зависимости концентрации электронов n ($I'-3'$) и дырок p ($I-3$) в слоях In_2Te_3 , $d = 0.6 \mu\text{мкм}$: (I, I') — $N_d = 4 \cdot 10^{15} \text{ см}^{-3}$, $N_t = 10^{13} \text{ см}^{-3}$; ($2, 2'$) — $N_d = 4 \cdot 10^{15} \text{ см}^{-3}$, $N_t = 2 \cdot 10^{15} \text{ см}^{-3}$; ($3, 3'$) — $N_d = 4 \cdot 10^{15} \text{ см}^{-3}$, $N_t = 10^{15} \text{ см}^{-3}$. *b* — температурные зависимости подвижности электронов μ_n ($I', 2'$) и дырок μ_p ($I, 2$) в слоях In_2Te_3 , $d = 0.6 \mu\text{мкм}$: (I, I') — $N_d = 4 \cdot 10^{15} \text{ см}^{-3}$, $N_t = 10^{13} \text{ см}^{-3}$; ($2, 2'$) — $N_d = 4 \cdot 10^{15} \text{ см}^{-3}$, $N_t = 2 \cdot 10^{15} \text{ см}^{-3}$.

мости от приложенного внешнего напряжения, а в напыленных пленках In_2Te_3 , $\text{In}_{2x}\text{Ga}_{2(1-x)}\text{Te}_3$ она наблюдается. Следовательно, можно сделать вывод, что характерное постоянное значение концентрации глубокого донорного уровня $N_d \sim 10^{15} \text{ см}^{-3}$ в пленках теллуридов, полученных различными способами, не зависит от структурного совершенства слоя и появление ЦЛЗ в исследуемых слоях связано не с дефектами на границах блоков, а с объемом теллурида. Для значения концентрации ловушечного уровня N_t , напротив, видна зависимость от величины напряжения, и это свидетельствует о связи величины концентрации ловушечных уровней с кристаллическим качеством слоя.

В работе [31] приведены результаты моделирования процессов токопрохождения в слоях типа $\text{A}_2^{\text{III}}\text{B}_3^{\text{VI}}$ гетероструктур на основе арсенида индия. Данные о параметрах ЦЛЗ в запрещенной зоне материала слоя In_2Te_3 используются для построения зависимости концентрации электронов и дырок от температуры образца (рис. 2, *a*) в исследованном интервале температур. Установлено, что в токопрохождении участвуют не только доноры, но и ловушки, и особенно интересным становится процесс их заполнения в результате нагрева образца. При более низких температурах, $T < 250 \text{ К}$, электропроводность образца обусловлена электронами и кон-

тролируется уровнями в верхней половине запрещенной зоны материала. При последующем нагреве в момент $T = 250-300 \text{ К}$ происходит изменение типа носителей, обеспечивающих преобладающий вклад в процесс токопереноса. Тогда особенность температурной зависимости тока $I(T)$ гетероструктуры $\text{Al}/\text{In}_2\text{Te}_3/\text{InAs}$ (n -типа) в работе [22], действительно, может быть обусловлена не истощением глубоких центров с энергией $\sim 0.5 \text{ эВ}$ в In_2Te_3 , а изменением степени заполнения в процессе нагрева образца глубокого уровня с энергией $\sim 0.36 \text{ эВ}$.

Для гетероструктур $\text{Al}/\text{In}_2\text{Te}_3/\text{InAs}$ (n -типа) проведен расчет величины подвижности электронов и дырок в исследуемом диапазоне температур. Известно, что в реальных полупроводниках строгая периодичность поля решетки нарушена в результате наличия в ней разных дефектов [24,25]. В силу этого механизм рассеяния носит сложный характер. Анализ зависимости, представленной на рис. 2, *b*, показывает, что во всей области температур подвижность дырок в теллуриде индия выше подвижности электронов, что совпадает с данными, приведенными в работе [23]. Другой особенностью этих зависимостей является отсутствие на них участков, отвечающих за рассеяние на ионизованных примесях, так как при уменьшении температуры подвижность носителей заряда тоже должна уменьшаться. Тогда можно

утверждать, что основной вклад в рассеяние носителей заряда в пленках теллуридов индия вносят дефекты кристаллической решетки In_2Te_3 , а также фоновые колебания [14,24].

Расчет дебаевской длины экранирования по значениям концентрации носителей заряда (рис. 2, а) показывает, что во всем исследуемом интервале температур $T = 70\text{--}400\text{ К}$ выполняется условие $d < L_d$ для слоя теллурида индия. Таким образом, результаты моделирования доказывают строгое выполнение всех условий, необходимых для использования в качестве материала диэлектрика слоя In_2Te_3 [8–10].

4. Заключение

Анализ результатов работы показал, что структуры $\text{In}_2\text{Te}_3/\text{InAs}$ и $\text{In}_{2x}\text{Ga}_{2(1-x)}\text{Te}_3/\text{InAs}$ ($x \approx 0,65$), независимо от способа получения, содержат на границе раздела глубокие центры с энергиями 0,36 и 0,5 эВ. При этом результаты моделирования подтверждают наличие изолирующих свойств диэлектрического слоя Π' в структурах МП'П в исследованном диапазоне температур $T = 70\text{--}400\text{ К}$ и, таким образом, свидетельствуют о перспективе использования гетероструктур $\text{In}_2\text{Te}_3/\text{InAs}$ и $\text{In}_{2x}\text{Ga}_{2(1-x)}\text{Te}_3/\text{InAs}$ ($x \approx 0,65$) в качестве полевых, в реализации концепции Б.И. Сыроева и В.Ф. Сынорова.

Авторы благодарят коллектив кафедры физики Воронежского государственного университета инженерных технологий, ранее возглавляемой проф. Безрядиным Николаем Николаевичем.

Часть работы выполнена при поддержке РФФИ в рамках проекта 15-52-61017 и при поддержке Минобрнауки России в рамках государственного задания ВУЗам в сфере научной деятельности на 2014–2016 годы. Проект № 757.

Список литературы

- [1] В.М. Лукашин, А.Б. Пашковский, К.С. Журавлев, А.И.Торопов, А.И. Лапин, Е.И. Голант, А.А. Капралова. ФТП, **48** (5), 684 (2014).
- [2] В.Ф. Сыноров, Б.И. Сыроев. *Проблемы диэлектрической электроники*. Сб. статей, под ред. С.А. Азимова (Ташкент, ФАН, 1974) с. 292.
- [3] Н.Н. Безрядин, А.С. Дронов, Т.А. Кузьменко, А.Н. Лихолет, Ю.В. Сыноров. *Микроэлектроника*, **27** (5), 353 (1998).
- [4] В.Н. Бессолов, М.В. Лебедев. ФТП, **32** (11), 1281 (1998).
- [5] Т. Сугано. *Введение в микроэлектронику* (М., Мир, 1988) [Пер. с яп. Т. Сугано, Т. Икома, Ё. Такэиси].
- [6] В.Г. Литовченко, А.П. Горбань. *Основы физики микроэлектронных систем металл–диэлектрик–полупроводник* (Киев, Наук. думка, 1978).
- [7] В.Ф. Сыноров, Н.Н. Безрядин, Б.И. Сыроев, Н.А. Мартынова. *Изв. вузов. Физика*, **1**, 82 (1981).
- [8] Б.И. Сыроев, А.Н. Лихолет, В.Ф. Сыноров, А.П. Ровинский. *Микроэлектроника*, **6** (5), 454 (1977).
- [9] Б.И. Сыроев, А.П. Ровинский, В.Ф. Сыноров, Н.Н. Безрядин. *Микроэлектроника*, **7** (2), 163 (1978).
- [10] В.Ф. Сыноров, Б.И. Сыроев. *Проблемы диэлектрической электроники*. Сб. статей, под ред. С.А. Азимова (Ташкент, ФАН, 1974) с. 292.
- [11] В.Л. Бонч-Бруевич, С.Г. Калашников. *Физика полупроводников* (М., Наука, 1977).
- [12] Н.Г. Абрикосов, В.Ф. Банкина, Л.В. Порецкая и др. *Полупроводниковые халькогениды и сплавы на их основе* (М., Наука, 1975).
- [13] В.М. Кошкин, Л.С. Палатник. *Изв. АН СССР. Неорг. матер.*, **4** (11), 1835 (1968).
- [14] Н.А. Горюнова. *Сложные алмазоподобные полупроводники* (М., Сов. радио, 1968).
- [15] Я.А. Угай. *Введение в химию полупроводников* (М., Высш. шк., 1975).
- [16] Б.И. Сыроев, Б.Л. Агапов, Н.Н. Безрядин и др. *Изв. РАН. Неорг. матер.*, **32** (12), 1449 (1996).
- [17] Н.Н. Безрядин, Ю.В. Сыноров, А.М. Самойлов и др. *Вестн. ВГТУ. Материаловедение*, **1** (11), 47 (2002).
- [18] Д. Луфт. *Физико-химические методы обработки поверхности полупроводников* (М., Радио и связь, 1982).
- [19] Б.Л. Агапов, Н.Н. Безрядин, В.Н. Моргунов, Ю.К. Шлык. *Межвуз. сб. (Воронеж, ВПИ, 1986) с. 86.*
- [20] Ю.К. Шлык, В.Н. Моргунов, Г.М. Щевелева, Н.Н. Безрядин, Т.А. Кузьменко. *Полупроводниковая электроника. Межвуз. сб. (Воронеж, ВПИ, 1985) с. 5.*
- [21] Л.А. Балагуров, О.Ю. Борковская, Н.Л. Дмитрук и др. *ФТП*, **10** (6), 1108 (1976).
- [22] Н.Н. Безрядин, Е.А. Михайлюк, А.В. Буданов, Т.В. Прокопова. *Вестн. ВГТУ, Воронеж*, **10** (4), 69 (2014).
- [23] В.М. Эккерман, Я.Е. Гегузин, Л.П. Гальчинецкий, В.М. Кошкин. *Легированные полупроводники* (М., Наука, 1975) с. 31.
- [24] *Технология тонких пленок*. Справочник под ред. Л. Майсела, Р. Глэнга, пер. с англ. (М., Сов. радио, 1977) т. 1.
- [25] Н.А. Горюнова. *ДАН СССР*, **121** (5), 848 (1958).
- [26] Б.И. Сыроев, Н.Н. Безрядин, А.В. Буданов, Т.В. Прокопова, Ю.К. Шлык. *Proc. 35 Intern. Wiss. Koll. — ТН. Imenau*, (1990) p. 15.
- [27] Е.А. Михайлюк, Т.В. Прокопова, Е.А. Татохин, Н.Н. Безрядин. *Вестн. ВГУ, Воронеж*, **10** (4), 37 (2014).
- [28] Б.Д. Ананьина, В.Л. Бакуменко, А.К. Бонаков и др. *ФТП*, **13** (5), 961 (1979).
- [29] В.П. Махний. *Изв. АН СССР. Неорг. матер.*, **27** (3), 519 (1991).
- [30] Е.А. Михайлюк, Т.В. Прокопова, Е.А. Татохин. *Евразийский Союз Ученых (ЕСУ)*, **5** (6), 7 (2014).
- [31] Е.А. Михайлюк, Т.В. Прокопова, Н.Н. Безрядин. *Конденсированные среды и межфазные границы*, **17** (2), 181 (2015).

Редактор Л.В. Шаронова

Deep centers at the interface in the heterostructures $\text{In}_{2x}\text{Ga}_{2(1-x)}\text{Te}_3/\text{InAs}$ and $\text{In}_2\text{Te}_3/\text{InAs}$

E.P. Domashevskaya[‡], *E.A. Mikhailyuk*⁺,
T.V. Prokopova^{*}, *N.N. Bezryadin*[‡]

⁺Stary Oskol Technological Institute
named after A.A. Ugarov (branch)
of National Research Technological University MISIS,
309500 Stary Oskol, Belgorod region, Russia

^{*}Military Training and Research Center
„Air force Academy named after
Professor N.E. Zhukovsky and Y.A. Gagarin“,
394064 Voronezh, Russia

[‡]Voronezh State University of
Engineering Technologies,
394064 Voronezh, Russia

Abstract The method of admittans, current-voltage and capacitance-voltage characteristics were used to study $\text{In}_{2x}\text{Ga}_{2(1-x)}\text{Te}_3/\text{InAs}$ and $\text{In}_2\text{Te}_3/\text{InAs}$, heterostructures obtained by the methods of the quasiclosed volume and evaporation. The spectrum of local power levels distribution at the interface is determined. The method of admittans allowed to find the new acceptor centers with energy 0.36 eV, along with the usual donors with energy 0.5 eV. Concentration of acceptor centers N_t depends on the way of fabrication and technological modes. The kinetics of generation-recombination processes in the interval 70–400 K does not influence on isolating properties of the dielectric layer of In_2Te_3 or $\text{In}_{2x}\text{Ga}_{2(1-x)}\text{Te}_3$ ($x \approx 0.65$). Demonstration of the possibility of using them as field heterostructures is given.