

06;12

Фоточувствительность гетероконтактов в системе слоистый полупроводник (A^3B^6)—камедь

© С.И. Драпак, З.Д. Ковалюк

Институт проблем материаловедения им. И.М. Францевича НАН Украины, Черновицкое отделение,
58001 Черновцы, Украина
e-mail: drapak@unicom.cv.ua

(Поступило в Редакцию 3 ноября 2006 г.)

Расширен диапазон материалов, которые могут использоваться в фоточувствительных структурах за счет привлечения органического вещества биологической природы — камеди. Исследованы вольт-амперные характеристики гетероконтактов в системе слоистый полупроводник (InSe, GaSe)—камедь. Предпринята попытка связать особенности спектрального распределения относительной квантовой эффективности исследуемых структур (возникновение фоточувствительности за краем собственного поглощения полупроводниковых подложек) с деформационным взаимодействием между конденсированными слоями камеди и поверхностью слоистых полупроводников A^3B^6 .

PACS: 81.05.-t

Создание и исследование различных типов гетероструктур относится к числу актуальных направлений современной оптоэлектроники [1]. В последнее время в процесс изготовления фоточувствительных гетероструктур все более широко вовлекаются органические вещества, как искусственно синтезированные, так и природного происхождения (белок, кожа, терпентин, мумии и др.) [2–5].

В настоящей работе сообщается о первом наблюдении фотовольтаического эффекта, который возникает при нанесении тонкого слоя камеди на поверхность слоистых полупроводников A^3B^6 (InSe, GaSe).

1. Камедь (К), или гуммоз косточковых пород, образуется в виде натеков на стволах и ветках листовых деревьев в местах их механического повреждения. Химический состав камеди различных деревьев различен. Для создания гетероконтактов использовалась камедь черешни (*Cerasus avium* (L.) Moench.). В состав камеди черешни (cherry gum) входит арабиноза ($C_5H_{10}O_5$), галактоза ($C_6H_{12}O_6$), маноза ($C_6H_{12}O_6$), ксилоза ($C_5H_{10}O_5$) и глюкуроновая кислота ($COH(COH)_4COOH$). Примесь белковых веществ в К черешни не превышает 0.6% [6]. Состав и свойства К черешни наиболее близки с таковым для камеди абрикоса, сливы и гуммиарабика [7]. Эти натуральные гидроколлоиды широко используются в промышленности в качестве клея, стабилизатора эмульсий и суспензий, для производства синтетического волокна. Благодаря комплексу таких свойств, как биологическая активность, биodeградируемость, биосовместимость, комплексообразующая и сорбционная способность К находит все более широкое применение в косметической и пищевой промышленности (в качестве добавок в безалкогольные напитки, колбасные изделия и др. [8]); в медицине и фармакологии (изготовление пластырей, масляных эмульсий, обволакивающих растворов, в качестве наполнителя в капсулах и таблетках, как вязкий компонент некоторых кровозамещающих рас-

творов [9]). Согласно [10], основные препятствия использования углеродных нанотрубок в бионанотехнологиях (недостаточная растворимость и диспергируемость нанотрубок в физиологических средах) могут быть успешно устранены после их модификации камедью. Используется К и в живописи — в качестве основы некоторых видов темперы [11].

2. Для изготовления гетероконтактов использовались подложки из $n(p)$ —InSe с концентрацией свободных электронов (дырок) $n(p) \sim 10^{14} \text{ cm}^{-3}$ и подвижностью основных носителей заряда перпендикулярно оси симметрии $S \mu_{\perp} \approx 700\text{--}800$ и $\approx 20\text{--}30 \text{ cm}^2/(\text{V} \cdot \text{s})$ для материалов n - и p -типов проводимости соответственно, при $T = 300 \text{ K}$, а также p —GaSe ($p \sim 10^{14} \text{ cm}^{-3}$ и $\mu_{\perp} \approx 30\text{--}40 \text{ cm}^2/(\text{V} \cdot \text{s})$ при той же температуре). InSe p -типа проводимости получали легированием селенида индия (этого полупроводника) Cd (Zn). Тонкие слои К толщиной $10 \pm 2 \mu\text{m}$ наносились на поверхность сколотых пластин слоистых полупроводников, с предварительно изготовленными тыльными контактами, из 60%-ного водного раствора хлоргидрата $Cl_3CCN(OH)$ по методике, описанной в [5]. В качестве токовыводящих контактов со стороны К и со стороны полупроводников p -типа проводимости использовалось серебро, а со стороны n —InSe — чистый In.

3. Как свидетельствуют исследования, все полученные таким образом структуры обладают выпрямляющими вольт-амперными характеристиками (ВАХ). Причем в зависимости от материала, используемого в качестве неорганической подложки, для гетероконтактов в системе слоистый полупроводник (InSe, GaSe)—К характерны два вида ВАХ. На рис. 1 этот факт иллюстрируется на примере структур n —InSe—К (кривая 1) и p —InSe—К (кривая 2). Для гетероконтактов n —InSe—К и p —GaSe—К (условно — первый тип структур) при напряжениях смещения $|V| = 2.5\text{--}3 \text{ V}$ прямой ток превышает обратный не менее чем в ~ 10 раз. При

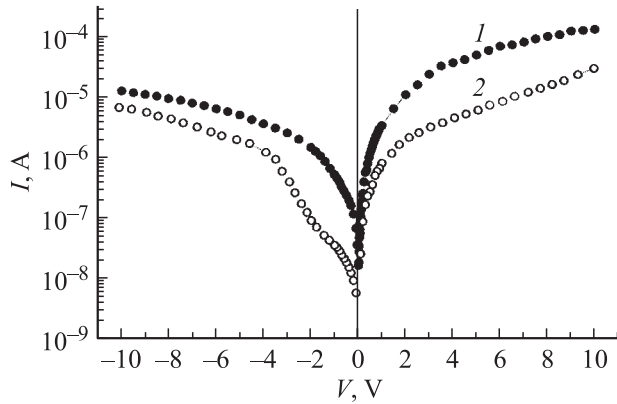


Рис. 1. Стационарные вольт-амперные характеристики структур n -InSe-K (1) и p -GaSe-K (2). Площадь слоя К на поверхности полупроводниковых подложек $S_K = 0.25 \text{ cm}^2$, металлического контакта со стороны органического вещества $S_{Ag} = 0.022 \text{ cm}^2$; $T = 297 \text{ K}$.

этом направлении пропускания соответствует отрицательной полярности внешнего источника тока на n -InSe (в структурах n -InSe-K) и положительной на p -GaSe (в структурах p -GaSe-K). Исследования ВАХ такого типа структур показали, что при прямых смещениях $V \leq 0.35\text{--}0.4 \text{ V}$ темновой ток описывается выражением, характерным для диодных структур на основе неорганических полупроводников [12]

$$I = I_s \exp(eV/nkT), \quad (1)$$

где диодный коэффициент $n \cong 4.5\text{--}5$ при комнатной температуре. Высокие значения n дают основания высказать предположение о туннельно-рекомбинационном механизме токопереноса в структурах n -InSe(p -GaSe)-К.

При увеличении прямого смещения ($V > 2\text{--}4 \text{ V}$) темновой ток начинает следовать линейному закону

$$I = (V - V_0)/R_0, \quad (2)$$

где напряжение отсечки $V_0 \cong 1.4\text{--}1.8$ и $3.6\text{--}4 \text{ V}$ для структур n -InSe-K и p -GaSe-K соответственно, а остаточное сопротивление R_0 в основном определяется параметрами использованных полупроводниковых подложек. В области небольших обратных смещений ($|V| < 0.8\text{--}1.2 \text{ V}$) ВАХ такого типа структур описывается выражением

$$I \sim (\varphi_0 - eV)^{1/2}, \quad (3)$$

что характерно для генерационно-рекомбинационных процессов в области пространственного заряда [12].

При увеличении обратного смещения темновой ток такого типа структур следует степенной зависимости $I \propto V^m$. При этом показатель степени m в диапазоне обратных смещений $0.8\text{--}1.2 < |V| < 10 \text{ V}$ близок к единице ($m \approx 1.1\text{--}1.2$), что обычно связывается с туннелированием или токами, ограниченными пространственным зарядом [13]. Пропускное направление в гетероконтактах p -InSe-K соответствует отрицательной

полярности внешнего источника тока на полупроводниковой подложке. Это означает, что в таких структурах p -InSe ведет себя как материал n -типа проводимости. Возможность реализации выпрямления (запорного слоя) при нанесении на поверхность p -InSe материалов как с большей, так и с меньшей величиной работы выхода, чем для моноселенида индия p -типа проводимости использована в [14] для изготовления высокоэффективных солнечных элементов на основе каскадной структуры ГТО- p -InSe-Au (КПД фотопреобразования $\approx 12\%$). Коэффициент выпрямления для структур p -InSe-K при напряжении $V \sim 1 \text{ V}$ составляет $10\text{--}12$. Однако при увеличении обратного смещения (при $|V| > 1.2\text{--}1.5 \text{ V}$) скорость возрастания темнового тока увеличивается, и при $|V| \approx 8\text{--}10 \text{ V}$ величина обратного тока практически становится сопоставимой с величиной прямого (рис. 1, кривая 2). Такая зависимость I от V характерна для туннельных диодов металл-диэлектрик-полупроводник на основе невырожденных полупроводников при наличии в приповерхностной области полупроводника слоя, обогащенного основными носителями заряда (антизапорного слоя) [12]. В общем случае ВАХ таких структур описывается выражением [12]

$$J = A^* \exp(-\alpha\varphi^{1/2}d) \exp(-e\varphi_{mi}/kT) \exp(eV/kT), \quad (4)$$

где A^* — эффективная постоянная Ричардсона, d — толщина диэлектрического слоя, φ — высота барьера в системе полупроводник-диэлектрик, а φ_{mi} — высота в системе металл-диэлектрик. Согласно [12], ток в такого типа структурах (в которых на границе раздела полупроводник-диэлектрик аккумулированы основные носители заряда) в обоих направлениях ограничен вероятностью туннелирования (множитель $\exp(-\alpha\varphi^{1/2}d)$ в выражении (4)), а не скоростью генерации носителей. Однако для структур p -InSe-K в области небольших обратных смещений ($|V| < 0.8\text{--}1.0 \text{ V}$) темновой ток описывается выражением (3), что свидетельствует о преобладании генерационно-рекомбинационных процессов над туннелированием. По всей видимости, такая ситуация может быть следствием образования дополнительного барьера в глубине полупроводниковой подложки.

Согласно [14], в том случае, когда зоны p -InSe изогнуты вверх (режим аккумуляции основных носителей заряда), уже при совсем незначительной величине приповерхностного изгиба зон в этом полупроводнике ($\psi_s \approx 0.2 \text{ eV}$) происходит ионизация глубоких донорных уровней. Причем концентрация электронов на глубоких донорных уровнях на несколько порядков превышает концентрацию дырок в глубине полупроводника. В результате селенид индия p -типа ведет себя, как материал n -типа проводимости в контакте с материалами, для которых работа выхода больше, чем для p -InSe. Однако в глубине полупроводника глубокие донорные уровни не ионизированы и p -InSe остается материалом p -типа проводимости. Как следствие — образование дополнительного барьера (p - n -перехода) в системе p -InSe-K на расстоянии от гетерограницы полупроводник-K, приблизительно равном ширине области пространственного заряда (при $\psi_s \geq 0.2 \text{ eV}$).

4. Освещение гетероконтактов слоистый полупроводник–К естественным светом сопровождается возникновением фотонапряжения, знак которого находится в корреляции с направлением пропускания ВАХ соответствующих структур и не зависит от энергии падающих фотонов и места локализации светового зонда (диаметром 0.2–0.4 mm) на фоточувствительной поверхности. Следует отметить, что для всех исследованных структур фоточувствительность преобладала при их освещении через слой органического вещества.

Типичные спектральные зависимости относительной квантовой эффективности фотопреобразования $\eta(h\nu)$, определенной как отношение фототока к числу падающих фотонов, для гетероконтактов в системе слоистый полупроводник–К при их освещении со стороны слоя К, приведены на рис. 2 (кривые 1–3) и рис. 3 (кривая 1). Как видно из этих рисунков, спектральное распределение η таких структур характеризуется наличием фоточувствительности за краем собственного поглощения соответствующей полупроводниковой подложки. При этом исследование спектров оптического поглощения при $T = 297$ K засвидетельствовало прозрачность тонких слоев К черешни в исследуемом диапазоне длин волн $\lambda = 0.4–1.55 \mu\text{m}$ (коэффициент пропускания $T^* \approx 93–95\%$ при толщине слоя $\sim 15–25 \mu\text{m}$ (рис. 3, кривая 3)). Коротковолновая часть $\eta(h\nu)$ гетероконтактов в системе слоистый полупроводник–К сходна со спектрами фоточувствительности гетеропереходов на основе неорганических материалов [12] или целого ряда структур полупроводник–вещество биологической природы, в которых органическая компонента играет роль „окна“ [2,5], и может быть интерпретирована аналогичным образом.

Согласно [15], появление фоточувствительности полупроводников за краем полосы поглощения является следствием образования дополнительного количества дефектов, например, под действием ионизирующего из-

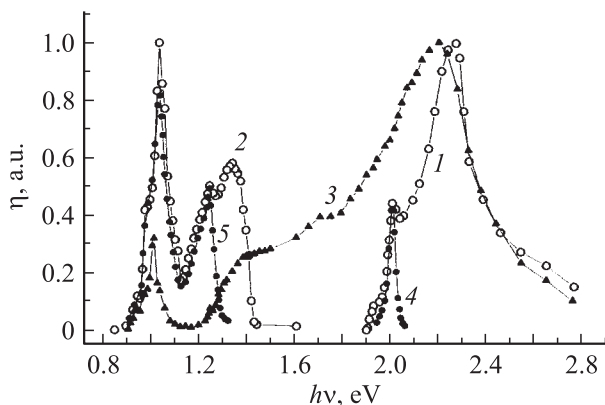


Рис. 2. Спектральные зависимости относительной квантовой эффективности фотопреобразования $\eta(h\nu)$ структур слоистый полупроводник–К (кривые 1–3 — освещение со стороны слоя органического вещества; 4, 5 — со стороны полупроводника), в которых в качестве полупроводниковой подложки использованы p -GaSe (1, 4), p -InSe (2, 5), n -InSe (3); $T = 297$ K.

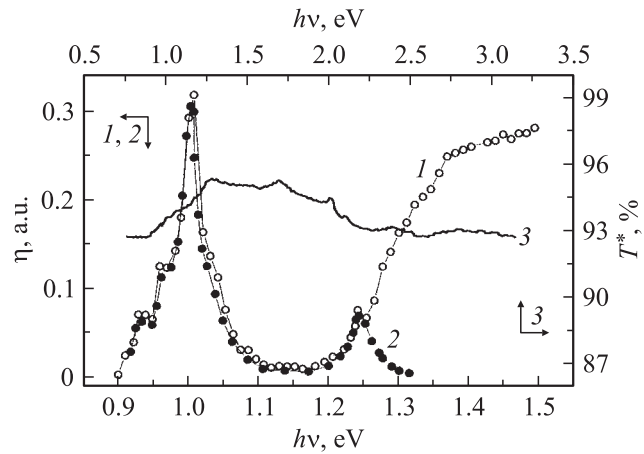


Рис. 3. Спектральные зависимости относительной квантовой эффективности фотопреобразования $\eta(h\nu)$ гетероструктуры n -InSe–К (кривая 1 — фрагмент $\eta(h\nu)$ при освещении структуры со стороны слоя органического вещества; 2 — освещение со стороны полупроводниковой подложки), а также спектр пропускания T^* слоя К толщиной $d \approx 15–25 \mu\text{m}$ (кривая 3); $T = 297$ K.

лучения. Образование дополнительного количества дефектов, в нашем случае, возможно в результате как химического, так и деформационного взаимодействия между конденсированным слоем органического вещества и полупроводниковой подложкой из селенидов индия и галлия. Слоистые соединения A^3B^6 характеризуются наличием двух видов связей в кристалле. Связь атомов внутри слоя сильная, преимущественно ковалентная с некоторой долей ионной, а между слоями — слабая, типа ван-дер-ваальсовой.

Каждый слой InSe(GaSe) в направлении, перпендикулярном оси симметрии C , содержит группу атомных плоскостей Se–In(Ga)–In(Ga)–Se. В верхней и нижней плоскостях слоя этих соединений расположены атомы халькогена, что должно было бы препятствовать химическому взаимодействию между слоистыми соединениями A^3B^6 и веществами, имеющими окислительную или кислотную природу [16]. Однако, как свидетельствуют исследования, например [16,17], поверхность скола InSe(GaSe) не лишена различного типа дефектов. Именно поэтому во время эксперимента наблюдается протекание химических реакций при обработке селенидов индия и галлия, например, азотной кислотой или концентрированными водными растворами нитратов некоторых малоактивных металлов (Ag^+ , Pd^+ , $\text{Hg}^{+1,+2}$) [16].

К сожалению, в литературе мы не нашли ответа на вопрос: возможно ли химическое взаимодействие между наиболее химически активной компонентой К черешни — глюконовой кислотой, которая участвует в удалении из организма человека атомов некоторых тяжелых металлов, а также ряда ядовитых веществ путем связывания их в глюкозиды [18], с InSe и GaSe или хотя бы с In и Ga в чистом виде? Деформационное взаимодействие между конденсированными пленками К

и подложками слоистых соединений A^3B^6 определяется их упругими постоянными. Расстояние между атомами в плоскости слоя $\text{InSe}(\text{GaSe})$ значительно меньше межслоевых расстояний, что и определяет анизотропию сил связей в таких кристаллах [19].

Для InSe расстояния между атомами Se и In внутри слоя ~ 2.53 , в $\text{GaSe} \sim 2.48 \text{ \AA}$ ($\text{Se}-\text{Ga}$). Поэтому упругие постоянные C_{11} и C_{12} , характеризующие модуль Юнга и коэффициент Пуассона в плоскости слоя, меньше для InSe ($C_{11} = 7.3 \cdot 10^{10}$, $C_{12} = 2.7 \cdot 10^{10} \text{ Pa}$), чем для GaSe ($C_{11} = 10.3 \cdot 10^{10}$, $C_{12} = 2.9 \cdot 10^{10} \text{ Pa}$) [19]. Это означает, что InSe легче деформируется в базисной плоскости, чем GaSe . В результате длинноволновая часть спектрального распределения фоточувствительности структур $\text{InSe}-\text{K}$ значительно более выражена, чем $\text{GaSe}-\text{K}$ (рис. 2, кривые 1–3; рис. 3, кривая 1). Различие между структурой соленидов индия n - и p -типов проводимости заключается в наличии примесных атомов $\text{Cd}(\text{Zn})$, которые расположены как в тетраэдрических и октаэдрических пустотах каждого монослоя, так и в межслоевом пространстве $p\text{-InSe}$ [14], т.е. дефектность селенида индия p -типа проводимости изначально больше, чем $n\text{-InSe}$. В результате большее количество полярных молекул органического вещества будет вовлечено „во взаимодействие“ с полупроводниковой подложкой, которая, в свою очередь, претерпит больше деформаций в процессе полимеризации слоя K . Увеличение количества дефектов на границе раздела полупроводник– K приводит к увеличению скорости поверхностной рекомбинации S_{sr} , что, в свою очередь, приводит к уменьшению спектрального отклика при высоких энергиях фотонов [12] в структурах $p\text{-InSe}-\text{K}$ по сравнению с $n\text{-InSe}-\text{K}$ (рис. 2, кривые 2, 3).

Уменьшение фоточувствительности при высоких $h\nu$ может быть связано и с образованием дополнительного барьера ($p-n$ -перехода) в непосредственной близости от границы раздела $p\text{-InSe}-\text{K}$. При этом интенсивность длинноволновой части спектрального распределения η (фоточувствительность „за краем“ полосы поглощения полупроводниковой подложки) значительно возрастает (рис. 2, кривая 2), а абсолютное значение интегральной вольтовой чувствительности структур $p\text{-InSe}-\text{K}$ (450–500 В/Вт) в 4–6 раз превышает аналогичную величину для структур на основе $n\text{-InSe}$ и $p\text{-GaSe}$, которые деформированы в меньшей степени, чем подложки из $p\text{-InSe}$.

При интерпретации различий в спектрах $\eta(h\nu)$ гетероконтактов $n\text{-InSe}$ ($p\text{-InSe}$)– K нельзя также исключить и возможности изменения физических свойств слоя органического вещества в результате его самопроизвольного легирования атомами $\text{Cd}(\text{Zn})$ (даже при отсутствии химического взаимодействия между компонентами K и атомами примеси) из приповерхностной области $p\text{-InSe}$. Такое предположение, без сомнения, требует проведения дополнительных исследований, однако не является бесосновательным.

Согласно литературным данным, смесь моно- и полисахаридов является активным биосорбентом ионов Zn ,

Cd и Hg [20], а также наночастиц металлов Cd , Cu , Ni , Pb и Zn [21]. Причем, как свидетельствуют результаты модельных экспериментов взаимодействия бактериальных экзополисахаридов с двумя формами цинка (сульфатом цинка ZnSO_4 и цинком в свободной форме $\text{Zn}(0)$ в виде металлической пудры) присутствие уоновых кислот (в том числе и глюконовой кислоты) в составе смеси из моно- и полисахаридов усиливает именно гидратацию металла в свободной форме [22]. В том случае, если самопроизвольное легирование K при нанесении ее на поверхность полупроводниковой подложки действительно имеет место, продолжение исследований в этом направлении является перспективным с точки зрения получения сверхтонких слоев $n\text{-InSe}$ на поверхности материала p -типа проводимости.

Еще одна особенность спектров $\eta(h\nu)$ в системе слоистый полупроводник– K заключается в наличии узких пиков в области края фундаментального поглощения соответствующей полупроводниковой подложки (рис. 2, кривые 1–3; рис. 3, кривая 1), которые характерны для фотопроводимости слоистых полупроводников A^3B^6 и обычно приписываются экситонным эффектам [23,24]. Причем наличие таких пиков в спектрах фоточувствительности структур на основе слоистых соединений связывается с совершенством интерфейса слоистый полупроводник–контактирующий материал [5,25].

Высокая анизотропия упругих свойств в слоистых кристаллах (для GaSe и InSe $C_{11}/C_{33} > 3$ и $C_{11}/C_{44} > 10$ [19]) позволяет легко сдвигать слои относительно друг друга в базисной плоскости (000 l) кристалла, поэтому релаксация упругих напряжений при взаимодействии между подложками из слоистых соединений и осажденным материалом может проходить в верхних слоях, которые имеют наноразмерную толщину.

Следует отметить, что интерес к исследованию процессов дефектообразования на поверхности слоистых полупроводников (самоорганизации структуры поверхности) под воздействием тех или иных технологических факторов (температурное воздействие в вакууме и воздушной атмосфере; различные режимы охлаждения полупроводниковой подложки после напыления на нее слоя металла и др.) в последнее время все более и более возрастает в связи с возможностью использования таких поверхностей в планарных нанотехнологиях [26]. Однако попытки связать особенности спектров фоточувствительности с теми или иными изменениями структуры поверхности слоистых соединений только начинают предприниматься [27]. Вполне вероятно, в результате полимеризации K на поверхности InSe (GaSe) деформация охватывает только один (несколько) слоев полупроводниковой подложки, а распределение фоточувствительности структур $\text{InSe}(\text{GaSe})\text{-K}$ отражает $\eta(h\nu)$ деформированной части (длинноволновая часть) и объема полупроводниковой подложки (коротковолновая часть спектров фоточувствительности).

При освещении структур $\text{InSe}(\text{GaSe})\text{-K}$ со стороны полупроводниковой подложки $\eta(h\nu)$ становится узкополосным. Так, для структур на основе GaSe спектральное распределение фоточувствительности представляет

собой одну узкую полосу с максимумом вблизи ширины запрещенной зоны этого полупроводника (рис. 2, кривая 4), что объясняется резким ростом оптического поглощения в полупроводниковой пластине при наступлении прямых межзонных переходов и удалением слоя фотогенерированных пар от области пространственного заряда. В то же время для структур InSe—К $\eta(h\nu)$ условно можно разделить на две части (рис. 2, кривая 5 и рис. 3, кривая 2). Если коротковолновая часть $\eta(h\nu)$ имеет максимум вблизи E_g и может быть интерпретирована аналогичным образом, как для структур GaSe—К, то длинноволновая часть фактически повторяет такую же в спектрах фоточувствительности структур при освещении их со стороны слоя органического вещества.

5. Таким образом, показана принципиальная возможность использования биологически активного вещества природного происхождения — камеди для изготовления гибридных органико-неорганических фоточувствительных структур для различных областей спектрального диапазона. Возникновение фоточувствительности за краем поглощения полупроводников в структурах слоистый полупроводник—камедь связывается с деформационным взаимодействием между конденсированными слоями камеди и поверхностью слоистых полупроводников системы A^3B^6 .

В завершение отметим целесообразность проведения дополнительных исследований структуры интерфейса слоистый полупроводник—камедь. В том случае, если структура поверхности слоистых полупроводников в результате деформационного взаимодействия с конденсированными слоями камеди окажется сходной с таковой, например, для определенным образом охлажденной системы слоистый полупроводник—напыленная пленка металла (в последнем случае структура интерфейса приобретает вид наноразмерного „гофра“, т.е. напоминает стиральную доску [28]), использование камеди в дефектной инженерии применительно к слоистым полупроводникам может быть более приоритетным по сравнению с металлами, поскольку исключает температурное воздействие на полупроводниковые подложки (при напылении пленок металла), а также использование травителей (для получения деформированных поверхностей, не покрытых металлической пленкой).

Список литературы

- [1] Алфёров Ж.И. // ФТП. 1998. Т. 32. Вып. 1. С. 3–18.
- [2] Рудь В.Ю., Рудь Ю.В., Вайполин А.А., Боднарь И.В., Fernelius N. // ФТП. 2003. Т. 37. Вып. 11. С. 1321–1328.
- [3] Драпак С.И., Ковалюк З.Д. // Письма в ЖТФ. 2004. Т. 30. Вып. 6. С. 73–78.
- [4] Боднарь И.В., Дмитриева Е.С., Рудь В.Ю., Рудь Ю.В. // ЖТФ. 2005. Т. 75. Вып. 3. С. 84–87.
- [5] Драпак С.И., Нетяга В.В., Прилуцкий Ю.И., Воробец М.О., Ковалюк З.Д. // Письма в ЖТФ. 2005. Т. 31. Вып. 11. С. 15–21.
- [6] Grossl M., Harrison S., Kaml I., Kenndler E. // J. Chromatogr. A. 2005. Vol. 1077. N 1. P. 80–89.
- [7] Hough L., Pribham J.B. // Biochem. J. 1959. Vol. 73. N 3. P. 550–554.
- [8] Шипулин В.И., Лупандина Н.Д., Радченко А.Г., Бутенко И.О. // Сб. науч. тр. СевКавГТУ. Сер. „Продовольствие“. 2005. № 1. С. 38–48.
- [9] Кондратьев В.И. Технология лекарственных форм. В 2-х т. М.: Медхимия, 1991.
- [10] Chen R.J., Bangsaruntip S., Drouvalakis K.A., Kam N.W.S., Shim M., Li Y., Kim W., Utz P.J., Dai H. // PNAS USA. 2003. Vol. 100. N 9. P. 4984–4989.
- [11] Vallance S.L., Singer B.W., Mitchen S.M., Townsend J.H. // J. Amer. Institute for Conservation. 1998. Vol. 73. N 3. P. 294–311.
- [12] Sze S.M. Physics of Semiconductor Devices. N.Y.: Wiley-Intersci, 1981. 456 p.
- [13] Ламперт Г., Марк П. Инжекционные токи в твердых телах. М.: Мир, 1973. 416 с.
- [14] Martinez-Pastor J., Segura A., Valdes J.L., Chevy A. // J. Appl. Phys. 1987. Vol. 62. N 4. P. 1477–1483.
- [15] Вавилов В.С. Действие излучений на полупроводники. М.: Физматгиз, 1963. 264 с.
- [16] Завражнов А.Ю., Турчен Д.Н. // Конденсированные среды и межфазные границы. 1999. Т. 1. Вып. 2. С. 190–196.
- [17] Бакуменко В.Л., Ковалюк З.Д., Тишин Е.А., Чижко В.Ф. // Физическая электроника. 1997. Т. 19. С. 123–126.
- [18] Wagner H. // Pure and Appl. Chem. 1990. Vol. 62. N 7. P. 1217–1222.
- [19] Абдуллаев Н.А. // ФТТ. 2006. Т. 48. Вып. 4. С. 623–629.
- [20] Tajmir-Riahi H.A. // Can. J. Chem. Rev. 1989. Vol. 67. N 4. P. 651–654.
- [21] Leusch A., Holan Z.R., Volesky B. // J. Chem. Technol. Biotechnol. 1995. Vol. 62. N 3. P. 279–288.
- [22] Лопарева Е.А., Гончарова Н.В. // Вестн. ПГУ. Сер. В „Прикладные науки“. 2005. № 3. С. 27–31.
- [23] Бакуменко В.Л., Ковалюк З.Д., Курбатов Л.Н., Чижко В.Ф. // ФТП. 1976. Т. 10. Вып. 9. С. 1045–1049.
- [24] Соболев В.В. Зоны и экситоны халькогенидов галлия, индия и таллия. Кишинев: Штринца, 1982. 272 с.
- [25] Ильчук Г.А., Кузьмэж В.В., Петрусь Р.Ю., Рудь В.Ю., Рудь Ю.В., Теруков Е.И., Украинец В.О. // ФТП. 2006. Т. 40. Вып. 11. С. 1356–1360.
- [26] Balitskii O.A. // Mater. Lett. 2006. Vol. 60. N 5. P. 594–599.
- [27] Drapak S.I., Bakhtinov A.P., Gavrylyuk S.V., Kovalyuk Z.D., Prylutskyu Yu.I., Matzui L.Yu. // Abstr. E-MRS-IUMRS-ICEM 2006 Spring Meeting Symp. A: Current Trends in Nanoscience — from Materials to Applications. Nice, 2006. P. A4/28.
- [28] Spiecker E., Hollensteiner S., Jager W., Schmid A.K., Minor A.M., Dahmen U. // Abstr. E-MRS 2005. Spring Meeting Symp. A: Current Trends in Nanoscience — from Materials to Applications. Strasbourg, 2005. P. A3/3.