

Исследование барьерных структур In/PbTe с промежуточным тонким диэлектрическим слоем

© О.А. Александрова[¶], А.Т. Ахмеджанов, Р.Ц. Бондоков, В.А. Мошников, И.В. Саунин, Ю.М. Таиров, В.И. Штанов*, Л.В. Яшина*

Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет им. В.И. Ульянова (Ленина), 197376 Санкт-Петербург, Россия

*Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова, 119899 Москва, Россия

(Получена 1 июня 2000 г. Принята к печати 1 июня 2000 г.)

Эпитаксиальные слои n -PbTe были выращены из газовой фазы методом горячей стенки на подложках из монокристаллического $\text{BaF}_2 \{111\}$. Выращенные слои выдерживались на воздухе в течение 15–30 дней, после чего напылялся In и защитный слой BaF_2 . На изготовленных таким образом барьерных структурах In/ n -PbTe измерялись вольт-амперные и фотоэлектрические характеристики в диапазоне $T = 80\text{--}300\text{ K}$. Анализ экспериментальных результатов позволил предложить модель механизма токопереноса и определить эффективную высоту барьера φ_b^{eff} , толщину диэлектрической прослойки δ и плотность поверхностных состояний D_S .

Введение

Интенсивные исследования структур металл–(халькогенид свинца) проводятся в течение трех десятилетий с целью применения в качестве фотоприемников излучения для ближнего и среднего инфракрасного (ИК) диапазонов длин волн [1]. Несмотря на большое количество экспериментальных результатов по вольт-амперным и фотоэлектрическим характеристикам таких структур, до настоящего времени не существует модельных представлений, объясняющих и предсказывающих экспериментальные результаты.

Большинство авторов при интерпретации полученных данных используют простейшие модели классических барьеров Шоттки и Бардина. При этом игнорируются процессы диффузии примесей и дефектов решетки, а также окисления поверхности слоев. Эти процессы способны существенно изменить как плотность поверхностных состояний на границе раздела фаз, так и характеристики структур из-за образования новых фаз либо инверсии типа проводимости в приповерхностном слое [2,3]. Анализ влияния толщины промежуточного диэлектрического слоя и плотности поверхностных состояний на электрические и вольт-амперные характеристики барьеров металл–полупроводник проведен в [4]. В работах [5,6] обнаружено образование оксидных фаз на границе раздела металл–полупроводник и химическое взаимодействие индия с халькогенидами свинца. Модели, учитывающие физические особенности процессов, протекающих в структурах металл–полупроводник с тонкими диэлектрическими слоями, систематизированы в [7]. При анализе структур на основе халькогенидов свинца необходимо дополнительно учитывать возможность

образования инверсного слоя в полупроводниках n -типа за счет диффузии кислорода. Такой эффект наблюдался в n -PbSe [8]. Ввиду большей электроотрицательности теллура образование инверсного слоя p -типа на поверхности n -PbTe возможно и при комнатной температуре [9]. Состав окисного слоя (PbO , TeO_2) зависит от времени выдержки структуры на воздухе [10]. Отмеченные особенности структур металл–(халькогенид свинца) определяют сильную зависимость вольт-амперных и фотоэлектрических характеристик от технологии изготовления приборов.

Цель настоящей работы — исследование влияния промежуточных диэлектрических и инверсных слоев на характеристики структур In/ n -PbTe.

Методика эксперимента

Эпитаксиальные слои теллурида свинца выращивали из газовой фазы методом горячей стенки по методике, подробно описанной в работе [11]. В качестве подложки использовали свежесколотый BaF_2 . Скорость конденсации составляла 2.7 мкм/ч при температуре подложки 600–630 К. Загрузка представляла собой шихту, предварительно отожженную при условиях, обеспечивающих

Параметры структур In/ n -PbTe при $T = 80\text{ K}$

Тип структуры	φ_b^{eff} , эВ	n_0	δ , нм	R_0A , Ом · см ²	S_{max} , В/Вт
1	0.114	1.29	44.9	4.2	1
2	0.121	2.61	59.3	22.8	47
3	0.134	4.58	70.5	64.2	256

Примечание. n_0 — коэффициент идеальности вольт-амперной характеристики.

[¶] FAX: (812) 234-31-64
E-mail: ME@eltech.ru

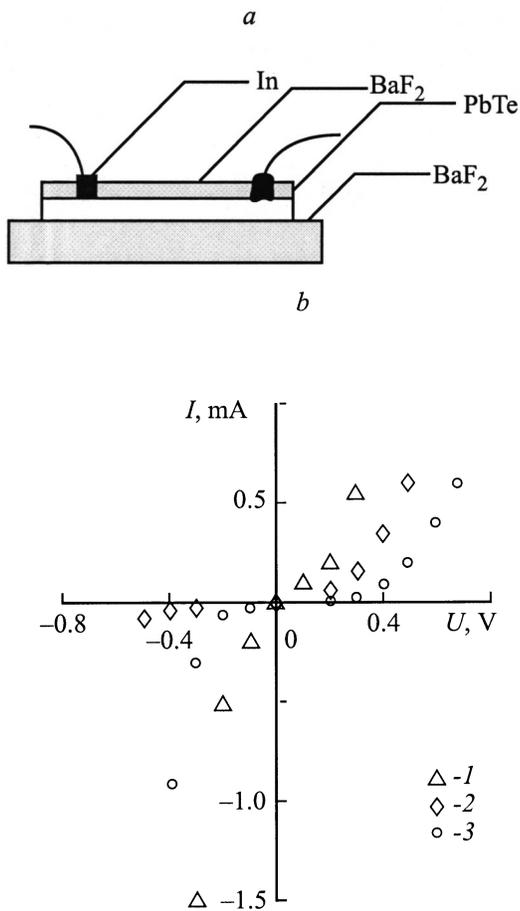


Рис. 1. *a* — схематический разрез типичной структуры In/*n*-PbTe, исследованной в работе; *b* — вольт-амперные характеристики структур при $T = 80$ К. Время выдержки на воздухе: 1 — 15 мин, 2 — 360 ч, 3 — 720 ч.

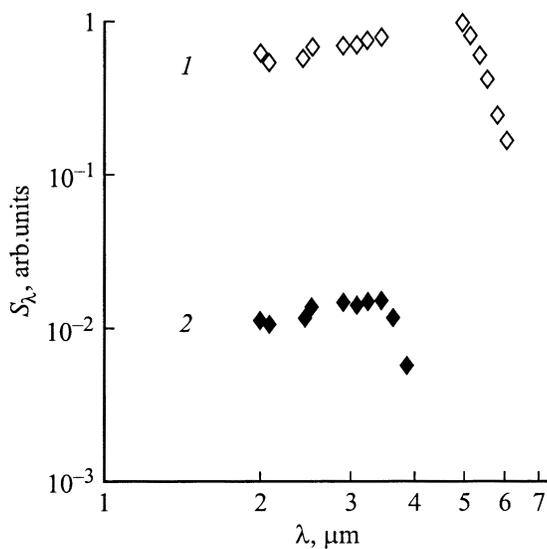


Рис. 2. Спектральные зависимости фоточувствительности для структур In/*n*-PbTe со временем выдержки на воздухе 360 ч, измеренные при температуре T , К: 1 — 80, 2 — 300.

минимальное общее давление паров в системе [12]. Полученные таким образом слои *n*-PbTe характеризовались подвижностью электронов $640 \text{ см}^2/(\text{В}\cdot\text{с})$ при 300 К и $850 \text{ см}^2/(\text{В}\cdot\text{с})$ при 80 К соответственно. Концентрация носителей заряда составляла $5 \cdot 10^{17} \text{ см}^{-3}$. Далее, на полупроводниковый слой *n*-PbTe через маску напылялся металл — висмут, свинец или индий. Вольт-амперные характеристики структур (Bi, Pb, In)/*n*-PbTe качественно не отличались друг от друга. При комнатной температуре они представляли собой прямые линии, а при охлаждении обнаруживалось появление барьера.

Подробный анализ вольт-амперных и фотоэлектрических характеристик проводили на структурах In/*n*-PbTe, схематически представленных на рис. 1, *a*. По описанной выше методике, в едином технологическом цикле выращивали слои PbTe *n*-типа проводимости. Выращенные слои в течение некоторого времени (от 15 мин до 1 месяца) выдерживались на воздухе при комнатной температуре. Формирование структур завершали напылением индия и защитного слоя BaF₂. Анализ вольт-амперных характеристик показал, что время выдержки существенно влияет на вид зависимостей. На рис. 1, *b* представлены вольт-амперные характеристики типичных структур с разным временем хранения слоев *n*-PbTe на воздухе перед нанесением индия. Здесь и далее (см. таблицу) для них применяются индексы 1, 2 и 3, причем время выдержки на воздухе составляло: $t_1 = 15$ мин, $t_2 \approx 360$ ч, $t_3 \approx 720$ ч. Дифференциальное сопротивление этих структур при комнатной температуре составляло: $R_1 = 50$ Ом, $R_2 = 70$ Ом, $R_3 = 90$ Ом. Обратные ветви вольт-амперных характеристик всех типов структур не имеют участка насыщения.

Фотоэлектрические характеристики снимали в режиме генерации фотоэдс. Три типа исследуемых структур сильно различались по абсолютному значению вольтваттной фоточувствительности S_λ . Максимальные значения S_λ при 4.83 мкм и величины R_0A представлены в таблице. На рис. 2 показаны спектральные характеристики фоточувствительности для структуры типа 2 при 80 и 300 К. Расчетное значение обнаружительной способности для структур типа 3 указывает на возможность их работы в режиме ограничения флуктуациями фонового излучения (BLIP-режиме).

Результаты эксперимента и их обсуждение

Для объяснения полученных экспериментальных результатов была рассмотрена диаграмма контакта металл-полупроводник с тонким диэлектрическим слоем (рис. 3, *a*), образующимся в результате окисления поверхности. Поскольку диффузия кислорода в структуре In/*n*-PbTe приводит к образованию приповерхностного инверсного слоя *p*-PbTe, учитывалась также возможность образования структуры In/ δ -слой/*p*-PbTe/*n*-PbTe

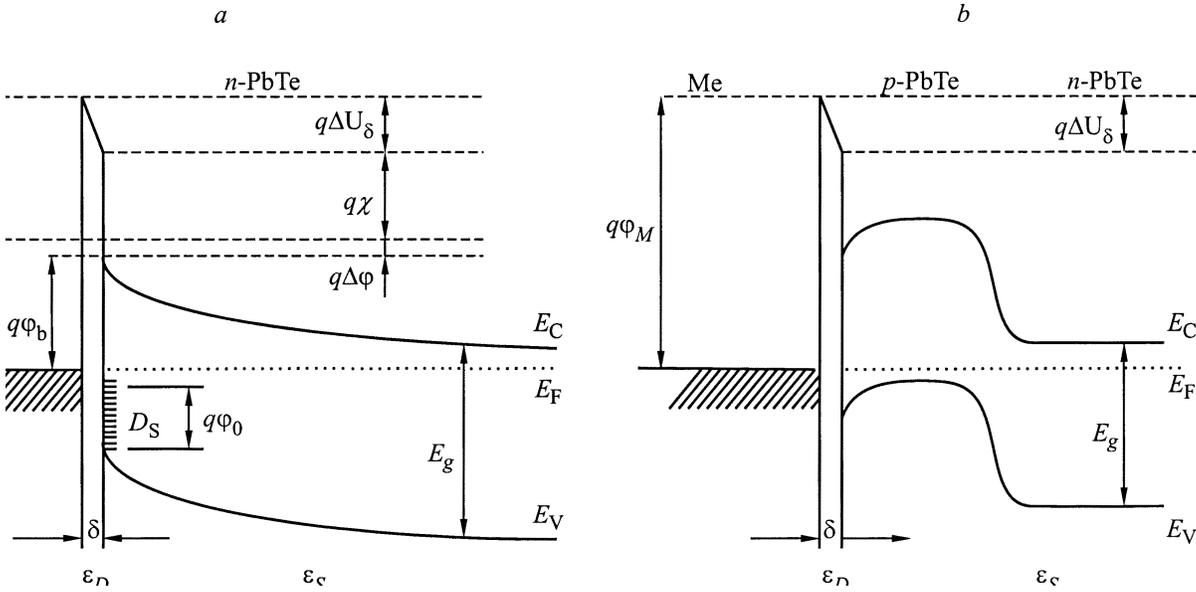


Рис. 3. Качественная энергетическая диаграмма структуры In/n-PbTe с промежуточным диэлектрическим слоем (a) и в случае образования инверсного слоя p-PbTe (b).

(рис. 3, b). На рис. 3 приняты обозначения: $q\varphi_M$ — работа выхода металла; φ_b — высота энергетического барьера; φ_{b0} — асимптотическое значение φ_b при нулевом напряжении смещения; φ_0 — уровень электронейтральности; ΔU_δ — падение потенциала на промежуточном диэлектрическом слое; δ — толщина промежуточного диэлектрического слоя; $\Delta\varphi$ — понижение барьера за счет действия сил изображения; χ — электронное средство полупроводника; D_S — плотность заряда поверхностных состояний; E_F — положение уровня Ферми; ε_D и ε_S — диэлектрические проницаемости промежуточного диэлектрического слоя и полупроводника соответственно.

Оценка роли диэлектрического и инверсного слоев на границе раздела In/n-PbTe проводилась на основе анализа вольт-амперных и фотоэлектрических характеристик. Во всех расчетах диэлектрический слой δ считался туннельно-прозрачным, и его роль сводилась лишь к падению части приложенного напряжения ΔU_δ на нем. Условием применимости диодной теории является критерий Бете: $l \gg d$, где l — средняя длина свободного пробега, $d = kT/qE_{\max}$ — расстояние, на котором барьер уменьшается на величину kT/q [2]. Величину l рассчитывали по формуле:

$$l = \mu(3nh^3/8\pi q^3)^{1/3} \simeq 34 \text{ нм.}$$

Максимальную величину электрического поля в области барьера рассчитывали как

$$E_{\max} = [2qN_D(\varphi_b - U - E_F)/\varepsilon_S]^{1/2}.$$

В этих выражениях k — постоянная Больцмана, T — температура, q — заряд электрона, E_{\max} — максимальное значение напряженности электрического поля

в барьере Шоттки, μ — подвижность носителей заряда, n — концентрация электронов, N_D — концентрация доноров, U — приложенное напряжение, φ_b — высота барьера Шоттки, измеренная относительно уровня Ферми в металле. Тогда максимальное значение $d \simeq 3.5 \text{ нм} < l \simeq 34 \text{ нм}$ и, следовательно, для структуры In/n-PbTe использование диодной теории является достаточно корректным.

Анализ механизмов протекания тока показал, что перенос заряда через границу раздела индий-(теллурид свинца) осуществляется в основном термоэмиссией электронов над барьером. Заметную роль также играет рекомбинация носителей заряда в нейтральной области как результат инжекции дырок. Туннелированием через барьер и рекомбинацией в области пространственного заряда можно пренебречь.

Вольт-амперная характеристика в этом приближении может быть аналитически записана в виде:

$$J = J_0 \exp(qU/kT - 1),$$

где

$$J_0 = A^* T^2 \exp(-q\varphi_b/kT),$$

$$A^* = (4\pi m^* q k^2 / h^3)$$

— постоянная Ричардсона для термоэмиссии, m^* — эффективная масса электрона.

В общем случае высота барьера φ_b зависит от напряжения смещения U и действия сил изображения $\Delta\varphi$, поэтому при определении методом вольт-амперных характеристик высота барьера является эффективной величиной φ_b^{eff} . К такому выводу можно прийти и исходя из

сложной структуры границы раздела In/n-PbTe. В данной работе уменьшением высоты барьера, вызванным действием сил изображения $\Delta\varphi$, мы пренебрегали из-за его малой величины. Высоту барьера при нулевом смещении $\varphi_{b0} \simeq \varphi_b^{\text{eff}}$ и коэффициент идеальности n_0 вычисляли путем аппроксимации вольт-амперных характеристик к нулевому смещению. Их значения для трех выбранных типов структур приведены в таблице. Полученные нами значения эффективной величины барьера φ_b^{eff} относительно хорошо коррелируют со значением φ_b^{eff} , полученным для структур In/p-Pb_{1-x}Sn_xTe в работе [13] и равным 0.09 эВ.

Представленные в таблице оценочные значения толщины слоя δ получены путем численного решения системы из двух нелинейных трансцендентных уравнений $\varphi_b^{\text{eff}} = f(U)$ и $n_0 = f(U)$ методом Ньютона с использованием стандартного пакета MS EXCEL-7.0. Величина плотности поверхностных состояний D_S , равная 10^{16} эВ⁻¹м⁻², рассчитана в предположении близости уровня нейтральности φ_0 к положению уровня Ферми, совпадающего с дном зоны проводимости n-PbTe. Значение диэлектрической проницаемости ε_D принималось равным $40\varepsilon_0$, что соответствует значениям ε_D для PbO [14].

Коэффициент инжекции дырок мы рассчитывали как

$$\gamma_p = J_p / (J_p + J_n),$$

где J_n и J_p — плотности электронного и дырочного токов соответственно. Для всех типов структур коэффициент инжекции принимал значения, близкие к 1. Это объясняется образованием инверсного слоя, который может достаточно эффективно инжектировать дырки в нейтральную область полупроводника. Наличие инверсного слоя может быть учтено введением последовательно включенного сопротивления R , зависящего от напряжения смещения U . Расчет величины R показал, что она уменьшается с увеличением напряжения смещения U по следующей зависимости:

$$R[\text{кОм}] = 48.9 \exp(-6.1U[\text{В}]),$$

полученной в результате аппроксимации экспериментальной вольт-амперной характеристики выражением

$$I = I_0 \exp[(U - IR)/kT],$$

где I_0 — экспериментально найденный ток насыщения. При использовании R в качестве подгоночного параметра было получено полное совпадение экспериментальных и расчетных кривых с точностью $\Delta I = 5 \cdot 10^{-4}$ мА.

На вид вольт-амперной характеристики туннельно-диэлектрический слой δ влияет прежде всего падением части потенциала ΔU_δ на нем. Что касается фотоэлектрических характеристик, особое значение имеет его роль в связи с плотностью поверхностных состояний D_S , так как уменьшение значения D_S приводит к увеличению фоточувствительности S_λ [13].

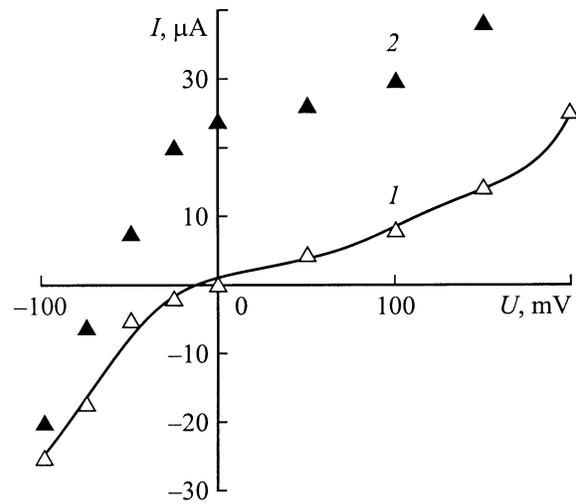


Рис. 4. Влияние освещения на вольт-амперные характеристики структуры In/n-PbTe со временем выдержки на воздухе 360 ч. Характеристики измерены: 1 — в темноте, 2 — при освещении.

Как видно из таблицы, полученные в данной работе образцы характеризуются увеличением S_λ при увеличении толщины диэлектрического слоя δ . При этом, несмотря на достаточно хорошие фотоэлектрические характеристики, данные структуры обладают высокой плотностью поверхностных состояний D_S . В этом случае высота барьера будет фиксироваться поверхностными состояниями, приближаясь к пределу Бардина [2]

$$q\varphi_b \approx E_g - q\varphi_0,$$

где E_g — ширина запрещенной зоны полупроводника, φ_0 — уровень, вплоть до которого поверхностные состояния заполнены (или уровень электронейтральности). Наличие такого барьера возможно для найденных нами значений $\delta \simeq 60-70$ нм, $D_S = 10^{16}$ эВ⁻¹м⁻². Поскольку плотность поверхностных состояний определяется только свойствами поверхности полупроводника, то легко объяснить слабую зависимость вольт-амперных характеристик от типа наносимого металла (Bi, Pb, In).

Причинами достаточно высоких значений D_S могут быть как классические поверхностные состояния, так и состояния, обусловленные хемосорбированными молекулами кислорода. Кислород, будучи окислителем, притягивает электроны из глубины полупроводника и тем самым создает дополнительные поверхностные каналы протекания тока [15]. Поверхность слоя PbTe покрывается кислородом достаточно быстро [9]. Время выдержки на воздухе образцов типа 1 — 15 мин. В течение этого времени маловероятно образование диэлектрического слоя. Однако хемосорбирующийся за это время кислород может инвертировать приповерхностный слой PbTe даже под защитной пленкой ВаF₂. Поэтому на структурах In/n-PbTe наблюдается как наличие барьера, так и заметная фотоздс. При освещении образца наблюдается

инверсия знаков напряжения холостого хода U_{oc} и тока короткого замыкания I_{sc} (см. рис. 4), что позволяет предположить, что основную роль в генерации фотоэдса играет поверхностный $p-n$ -переход.

Падение потенциала ΔU_δ на диэлектрическом слое приводит к тому, что высота барьера при нулевом смещении φ_{b0} оказывается меньше, чем для идеального диода [3]. При увеличении толщины слоя δ , высота барьера φ_b должна уменьшаться. Однако, как видно из таблицы, это противоречит нашему эксперименту. Измеряемая величина φ_b^{eff} представляет собой "разность" между высотой барьера $p-n$ -перехода и величиной φ_b контакта In/n-PbTe (рис. 3, b). По мере увеличения выдержки на воздухе толщина p -области должна увеличиваться и все больший вклад будет давать высота барьера $p-n$ -перехода.

Другим важным следствием увеличения толщины диэлектрического слоя δ должно являться уменьшение тока при одном и том же прямом смещении, поскольку электронам необходимо проходить через барьер, образованный этим слоем, что и наблюдается в эксперименте. Этот же эффект должен приводит к увеличению коэффициента идеальности n_0 с увеличением толщины δ , что также соответствует эксперименту (см. таблицу). Сами значения n_0 являются аномально большими и зависимость $\ln J$ от напряжения смещения U нелинейна. Две основные причины могут приводить к этому: наличие тонкого диэлектрического слоя достаточной толщины и рекомбинация в области пространственного заряда. Анализ механизмов протекания тока показал, что вторая причина не имеет места для структур In/n-PbTe. Поэтому значения $n_0 = 1.3-4.6$ можно связать с наличием диэлектрического слоя ($\delta \approx 70$ нм).

Другое влияние диэлектрического слоя состоит в увеличении коэффициента инжекции неосновных носителей при прямых смещениях. Согласно [2], за счет увеличения толщины диэлектрического слоя можно добиться улучшения инжекционной способности диодов только до $\gamma \approx 0.1$. В нашем случае для структур In/n-PbTe $\gamma \approx 1$. Причиной большого значения коэффициента инжекции неосновных носителей может быть образующийся в приповерхностной области $p-n$ -переход.

При обратных смещениях отсутствие тока насыщения может объясняться несколькими причинами. Наличие туннельно-диэлектрического слоя приводит к тому, что эффективная высота барьера φ_b^{eff} уменьшается с увеличением напряжения смещения U , но уменьшение тока, связанное с туннельным прохождением через образованный диэлектриком барьер, может быть скомпенсировано для тонкого барьера увеличением тока, связанного со снижением эффективной высоты барьера φ_b^{eff} . Образование инверсного слоя приводит к образованию двух встречно-включенных переходов, и, как видно из рис. 3, b, прямое смещение для структуры In/n-PbTe должно быть обратным для этого $p-n$ -перехода.

Заключение

Из анализа характера изменения вида вольт-амперных и фотоэлектрических характеристик структур In/n-PbTe в зависимости от времени выдержки на воздухе следует, что наличие диэлектрического слоя на границе раздела приводит к следующим эффектам: 1) отсутствует зависимость вида вольт-амперных характеристик от типа используемого металла; 2) эффективная высота барьера при нулевом смещении меньше, чем для идеального $p-n$ -перехода; 3) при увеличении времени выдержки на воздухе наблюдается уменьшение тока при заданном значении напряжения смещения и увеличение коэффициента идеальности вольт-амперных характеристик; 4) высота барьера зависит от напряжения смещения; 5) отсутствует насыщение в обратных ветвях вольт-амперных характеристик.

С другой стороны, наличие $p-n$ -перехода в приповерхностной области приводит к следующему: 1) высота барьера увеличивается с увеличением времени выдержки на воздухе; 2) барьерные эффекты проявляются и в структурах с малыми временами выдержки на воздухе, в которых образование диэлектрического слоя маловероятно; 3) расчетный коэффициент инжекции дырок в структуре близок к 1; 4) отсутствует насыщение в обратных ветвях вольт-амперных характеристик; 5) при освещении наблюдается инверсия знака напряжения холостого хода.

Работа выполнена при поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (№ 97-03-33334а).

Список литературы

- [1] Н.Н. Берченко, Д.Ш. Заридзе, А.В. Матвеев. Зарубежная электронная техника, № 4, 34 (1979).
- [2] Х. Родерик. *Контакты металл-полупроводник* (М., Радио и связь, 1982).
- [3] В сб.: *Тонкие пленки — взаимная диффузия и реакции*, под ред. Д. Поута, К. Ту, Д. Мейера (М., Мир, 1982).
- [4] В.И. Стриха, Е.В. Бузанева, И.А. Радзиевский. В сб.: *Полупроводниковые приборы с барьером Шоттки (Физика, технология, применение)*, под ред. В.И. Стрихи (М., Сов. радио, 1974).
- [5] Г.А. Гришина, И.А. Драбкин, Ю.П. Костиков, А.В. Матвеев, Н.Г. Протасова, Д.А. Саксеев. Изв. АН СССР. Неорг. матер., **18** (10), 1709 (1982).
- [6] Г.А. Гришина, И.А. Драбкин, Ю.П. Костиков, А.В. Матвеев, Д.А. Саксеев. Изв. АН СССР. Неорг. матер., **23** (11), 1839 (1987).
- [7] Е.В. Бузанева. *Микроструктуры интегральной электроники* (М., Радио и связь, 1990).
- [8] В.Т. Трофимов, Ю.Г. Семенов, Е.Г. Чижевский. ФТП, **30**, 755 (1996).
- [9] A.L. Hagstrom, A. Fahlman. Appl. Surf. Sci., **1**, 455 (1978).
- [10] R. Bettini, H.J. Richter. Surf. Sci., **80**, 334 (1979).

- [11] О.А. Александрова, Р.Ц. Бондоков, И.В. Саунин, Ю.М. Таиров. ФТП, **32**, 1064 (1998).
- [12] В.П. Зломанов, А.В. Новоселова. *P-T-x-диаграммы систем металл-халькоген* (М., Наука, 1987).
- [13] Т.А. Гришина, Н.Н. Берченко, Г.И. Годердзиашвили, И.А. Драбкин, А.В. Матвеев, Т.Д. Мхендзе, Д.А. Саксеев, Е.А. Третьякова. ЖТФ, **57**, 2355 (1987).
- [14] Г.А. Бордовский, В.А. Извозчиков. *Естественно-неупорядоченный полупроводниковый кристалл* (СПб., Образование, 1997).
- [15] R.Tz. Bondokov, D.Tz. Dimitrov, V.A. Moshnikov, M.F. Panov, I.V. Saunin. *Proc. 5th Int. Conf. on Material Science and Material Properties for Infrared Optoelectronic* (Kiev, Ukraine) [Proceeding of SPIE, **3890**, 241 (1999)].

Редактор Т.А. Полянская

An investigation of In/*n*-PbTe barrier structures with a thin intermediate insulator layer

O.A. Alexandrova, A.T. Ahmeganov, R.Tz. Bondokov,
V.A. Moshnikov, I.V. Saunin, Yu.M. Tairov,
V.I. Shtanov*, L.V. Yashina*

St. Petersburg State Electrotechnical University,
197376 St. Petersburg, Russia

*Moscow State University,
119899 Moscow, Russia

Abstract Epitaxial layers of *n*-PbTe have been grown by the hot wall epitaxy technique on BaF₂ {111} single crystal chips in conditions of the congruent sublimation. As-grown *n*-PbTe layers before In deposition were kept at room temperature in O₂-content medium from 15 to 30 days. Voltage-current characteristics and photoelectric sensitivity spectra of In/*n*-PbTe barrier structures have been measured in the temperature range 80–300 K. Theoretical analysis of experimental results allows to suggest a model of current transport in In/*n*-PbTe structures. The effective barrier height φ_b^{eff} , thickness of insulator layer δ , the inversion layer surface resistance R , the ideality coefficient n_0 and the surface state density D_s are calculated.