

УДК 621.315.592

## О ВЛИЯНИИ ПОДСВЕТКИ НА ЭЛЕКТРОФИЗИЧЕСКИЕ ПАРАМЕТРЫ КОНТАКТОВ К ОБРАЗЦАМ CdTe

© 2013 г. А. Г. Белов, В. А. Голубятников\*, Ф. И. Григорьев\*,  
А. П. Лысенко\*, Н. И. Строганкова\*, М. Б. Шадов\*

Открытое акционерное общество «Государственный научно-исследовательский и проектный институт редкометаллической промышленности «ГИРЕДМЕТ»,  
\*Национальный исследовательский университет «Высшая школа экономики»

Исследованы вольт-амперные характеристики (ВАХ) и проведены измерения удельного электрического сопротивления и коэффициента Холла образцов высокоомного теллурида кадмия при комнатной температуре. Исследованные образцы вырезаны из слитков, выращенных методом движущегося теплового поля и легированных хлором на уровне  $\approx 2 \cdot 10^{17} \text{ см}^{-3}$  (в шихте). В качестве контактных материалов использованы индий и золото.

Измерения электрофизических параметров проведены на образцах квадратной формы по методу Ван-дер-Пау в диапазоне магнитных полей до 1,5 Тл в условиях регулируемой подсветки приконтактных областей белым светом. На этих же образцах исследованы ВАХ. Кроме того, ВАХ исследованы в условиях засветки образца монохроматическим излучением с длиной волны 480 нм через покрытые золотом грани образца. Установлено, что освещение областей вблизи контактов приводит к заметному (на два—три порядка) уменьшению сопротивления образца-двухполюсника. Обнаружено, что наблюдаемые ВАХ были линейными и в большинстве случаев проходили через начало координат, что свидетельствует об отсутствии фото-ЭДС. При увеличении интенсивности подсветки угол наклона ВАХ к оси абсцисс заметно увеличивался. Аналогичные результаты получены при засветке через золотое покрытие. Показано, что подсветка приконтактных областей образца позволяет измерить удельное электрическое сопротивление и коэффициент Холла, что невозможно сделать в отсутствие подсветки.

**Ключевые слова:** теллурид кадмия, подсветка приконтактных областей, удельное электрическое сопротивление, коэффициент Холла, вольт-амперные характеристики.

### Введение

Теллурид кадмия (КТ) и твердые растворы на основе теллурида кадмия-цинка (КЦТ) являются перспективными материалами для создания детекторов ионизирующих излучений, а также для использования в качестве материала подложек для получения эпитаксиальных гетероструктур  $\text{Cd}_x\text{Hg}_{1-x}\text{Te}/\text{Cd}_{1-y}\text{Zn}_y\text{Te}$  (КРТ/КЦТ).

Материалы КТ и КЦТ давно и широко исследуют. Однако некоторые проблемы еще далеки от разрешения. В частности, остро стоит вопрос о создании линейных контактов к образцам КТ и КЦТ  $p$ -типа электропроводности, в особенности при проведении электрофизических измерений на малых токах [1—10]. Процессы, происходящие на границе раздела металл—полупроводник, рассматривали в работе [8], а механизмы протекания тока через контакт — в обзоре [9]. Считают, что наиболее подходящим материалом для создания омических контактов к КЦТ  $n$ -типа электропроводности является индий, который наносят либо простой пайкой, либо напылением в вакууме, а к  $p$ -КЦТ — золото или платина [2, 11—13]. В работе [14] на основе компьютерного моделирования предпринята попытка построить зонную диаграмму материала КТ с различными типами контактов; с полученными результатами по-

лемизируют авторы работы [15], которые считают предложенную модель не вполне адекватной.

В упомянутых выше работах описаны различные способы изготовления контактов (пайка, напыление, создание инверсных слоев и др.), но всем этим методам присущи определенные недостатки. Во-первых, перечисленные методы достаточно трудоемки и требуют применения специальных технологий. Во-вторых, далеко не всегда контакты получаются линейными. Встречаются и случаи, когда контакты вроде бы омические, но их сопротивление настолько велико (превышает сопротивление собственно образца на три—четыре порядка), что измерение слабых сигналов оказывается невозможным. Так например, золото хорошо «работает» на высокоомных образцах КЦТ  $p$ -типа электропроводности ( $\rho > 10^7 \text{ Ом} \cdot \text{см}$ ) и гораздо хуже — на низкоомном «подложечном»  $p$ -КЦТ ( $\rho \sim 10 \div 10^3 \text{ Ом} \cdot \text{см}$ ).

Ниже опробован принципиально новый подход: применяя самые простые методы получения контактов, попытаться получить линейные контакты к материалу CdTe  $p$ -типа электропроводности за счет подсвечивания приконтактных областей образца при регулировании интенсивности подсветки. В качестве контактных материалов использовали золото и индий; варьировали также режимы подсветки приконтактных областей.

Исследовали вольт–амперные характеристики (ВАХ) контактов, а также проводили измерения электрофизических параметров в условиях регулируемой подсветки приконтактных областей образца.

### Образцы и методы исследования

Слитки КТ, из которых вырезали исследованные образцы, получали методом движущегося теплового поля (ТМ). Слитки легировали хлором на уровне  $\approx 2 \cdot 10^{17}$  см<sup>-3</sup> (в шихте). Выращенные слитки разрезали на пластины, которые для удаления нарушенного слоя подвергали химико–механической полировке с использованием травителя состава Br<sub>2</sub> — HBr — этиленгликоль (0,1 : 1,0 : 1,2). Характеристики исследованных образцов представлены в таблице.

В зависимости от способа измерения в качестве контактных материалов использовали индий (In 000) или золото. Индий с помощью микропаяльника наносили на заранее подготовленную поверхность образца в местах будущих контактов. К индиевым контактным площадкам припаивали луженые медные проволочки или присоединяли пружинные контакты.

Золотые контактные площадки изготавливали путем химического осаждения золота из 5%-ного водного раствора золотохлористо–водородной кислоты. К золотым площадкам присоединяли прижимные контакты. Измерения параметров образцов проводили при комнатной температуре.

Для исследования ВАХ применяли специально изготовленный прибор (вахограф), используемый в комплексе с осциллографом ТЕКТРОНИХ TDS 510 4В. Такой комплекс позволял исследовать участки ВАХ с дифференциальным сопротивлением от 10<sup>-2</sup> до 10<sup>13</sup> Ом. Специальное коммутирующее устройство позволяло подключать к вахографу любую пару контактов (при использовании четырехконтактной схемы измерения).

Измерения удельного сопротивления и коэффициента Холла проводили на стенде «Холл» (ОАО «Гиредмет») по методу Ван–дер–Пау в диапазоне магнитных полей 0—1,5 Тл. Для исследований ВАХ использовали две различные методики измерений.

**Методика 1: гальваномагнитные измерения в условиях регулируемой подсветки приконтактных областей образца.** Образец 1 (см. таблицу) с припаянными по углам индиевыми контактными площадками помещали в специальный держатель (рис. 1).

Во вставке сделаны четыре цилиндрические проточки 1, в которые вставляли миниатюрные лампы накаливания 2. В углубление 3 установлена изолирующая слюдяная прокладка 4, на которую контактами вниз укладывали исследуемый образец 5.

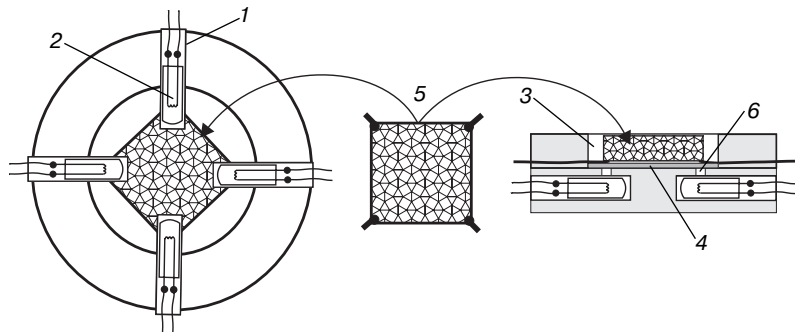


Рис. 1. Схема держателя образца:

1 — цилиндрические проточки; 2 — лампы накаливания (6,3 В); 3 — углубление; 4 — слюдяная прокладка; 5 — исследуемый образец; 6 — отверстия для подсветки приконтактной области

### Параметры исследованных образцов CdTe

Образец	Размеры образца, мм			Материал контактов
	Длина	Ширина	Толщина	
1	10	10	2,1	Индий
2	5	5	2,5	Золото

Напротив каждого контакта просверлено отверстие 6, ведущее в проточку, в которую устанавливали лампу, таким образом, чтобы отверстие, с одной стороны, находилось напротив нити лампы, а с другой — напротив области контакта.

Через отверстия и слюдяную прокладку на приконтактные области образца падал световой поток, создаваемый лампами накаливания (белый свет). Конструкция вставки обеспечивала засветку только приконтактных областей (основная часть образца закрыта светонепроницаемым экраном). Интенсивность свечения четырех последовательно соединенных ламп можно регулировать, изменяя подводимую мощность. Такое устройство позволяло проводить гальваномагнитные измерения и исследовать ВАХ любых пар контактов в условиях регулируемой подсветки приконтактных областей (освещалось не более 5 % общей площади образца).

**Методика 2: подсветка рабочих граней образца монохроматическим светом (480 нм) через золотые площадки.** Измерительное устройство (рис. 2) со-

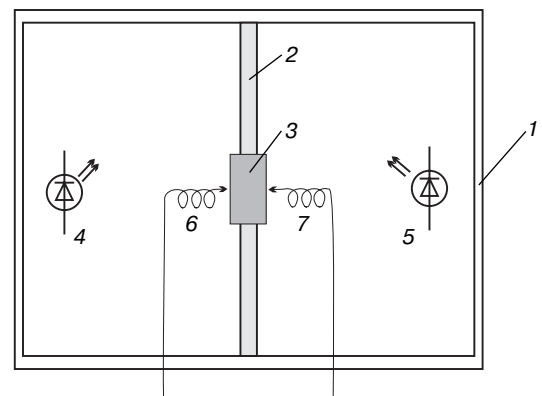


Рис. 2. Схема держателя образца по методике 2 (вид сверху):

1 — металлический корпус; 2 — текстолитовая перегородка; 3 — исследуемый образец; 4, 5 — светодиоды; 6, 7 — прижимные контакты

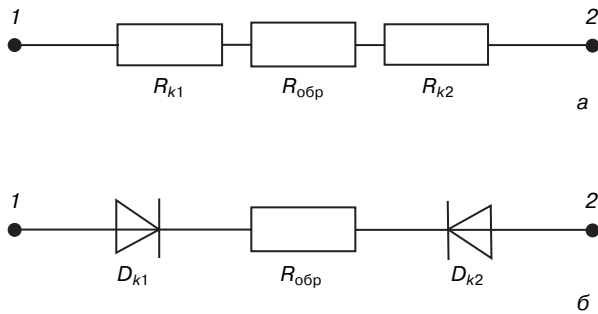


Рис. 3. Эквивалентная схема образца–двухполюсника: а — контакты омические; б) контакты выпрямляющие ( $R_{k1}$ ,  $R_{k2}$  — сопротивления контактов 1 и 2 соответственно;  $D_{k1}$ ,  $D_{k2}$  — эквивалентные выпрямляющим контактам диоды (включены навстречу друг другу);  $R_{обр}$  — сопротивление толщи образца)

стояло из металлического корпуса 1, разделенного на две равные части текстолитовой перегородкой 2. Исследуемый образец 3 (образец 2, см. таблицу) с покрытыми золотом рабочими ( $5 \times 5 \text{ мм}^2$ ) гранями вертикально устанавливали внутрь отверстия в перегородке 2. С двух сторон позолоченные грани образца освещались светодиодами 4 и 5; прижимные контакты 6 и 7 также были расположены с двух сторон. Яркость светодиодов можно было регулировать независимо.

### Результаты и их обсуждение

Эквивалентная схема образца–двухполюсника с контактами представлена на рис. 3. Поскольку освещаются лишь приконтактные области, можно считать, что  $R_{обр}$  не будет зависеть от интенсивности излучения. Наоборот,  $R_{k1}$  и  $R_{k2}$  (или эквивалентные сопротивления диодов  $D_{k1}$  и  $D_{k2}$ , включенных навстречу друг другу) должны зависеть от условий освещения. Если изменением интенсивности освещения удастся добиться выполнения условия  $R_{k1}$ ,  $R_{k2} \ll R_{обр}$ , то влиянием контактов можно пренебречь. Тогда сопротивление двухполюсника определяется значением  $R_{обр}$ , т. е. свойствами материала образца, а не контактов. Экспериментально это должно выражаться в выходе зависимости сопротивления двухполюсника от интенсивности излучения «на насыщение». Также можно ожидать, что и вид ВАХ претерпит изменения.

На рис. 4 приведены ВАХ одной пары контактов (1–2), снятых на образце 1 по методике 1 в отсутствие подсветки (а) и при максимальном уровне подсветки (б); на других парах контактов получены похожие результаты.

Определяя сопротивление двухполюсника по наклону ВАХ, получим, что в отсутствие подсветки сопротивление  $R_{темн} \approx 1 \cdot 10^9 \text{ Ом}$ , а при максимальной интенсивности подсветки  $R_{осв} \approx 1,2 \cdot 10^6 \text{ Ом}$ . Иначе говоря, подсветка 5 % площади образца вблизи контактов приводит к уменьшению сопротивления почти на три порядка.

При подсветке двух контактов ВАХ образцов, оставаясь линейной и меняя наклон, проходила через начало координат. Это означает, что при подсветке контактов фото–ЭДС либо не возникает, либо фото–ЭДС, возникающая в области каждого контакта, одинакова и противоположна. Однако при подсветке контактов светом разной интенсивности фото–ЭДС также не наблюдалась. Такое поведение возможно в том случае, если неравновесные носители заряда генерируются в области, в которой область пространственного заряда (ОПЗ) отсутствует.

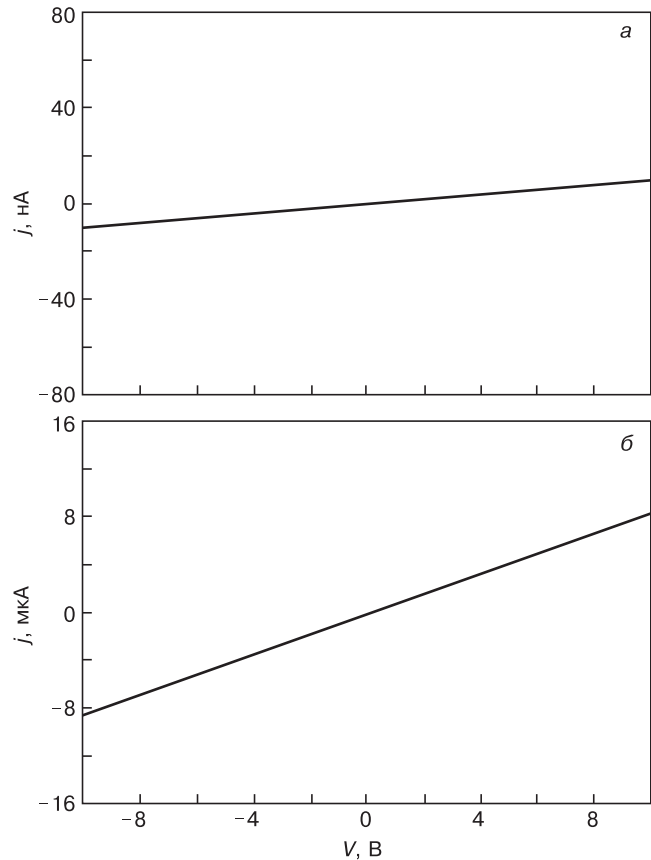


Рис. 4. ВАХ образца 1 в отсутствие подсветки (а) и при максимальном уровне подсветки приконтактных областей (б), измеренные по методике 1

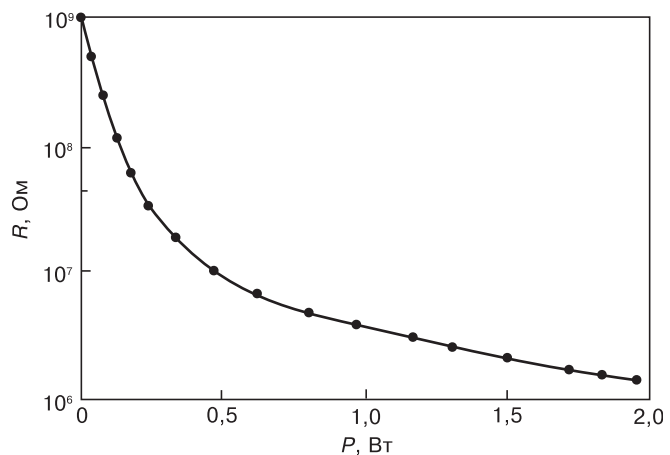


Рис. 5. Зависимость сопротивления образца от потребляемой мощности (в расчете на 1 лампу)

На рис. 5 представлена зависимость сопротивления образца 1 (контакты 1—2) от мощности, потребляемой лампами.

Как видно из рис. 5, при увеличении мощности кривая вначале убывает довольно быстро, а затем это убывание замедляется. Однако на насыщение кривая так и не выходит.

Параллельно с исследованиями ВАХ на образце 1 выполняли измерения электрофизических параметров по методу Ван-дер-Пау (методика 1) при максимальной подсветке приконтактных областей. Полученные данные представлены ниже.

Мощность, потребляемая 4 лампочками, Вт .....	8,0
Удельное электрическое сопротивление, Ом · см .....	$4,7 \cdot 10^5$
Коэффициент Холла, см <sup>3</sup> /Кл .....	$+1,5 \cdot 10^7$
Холловская концентрация свободных носителей заряда, см <sup>-3</sup> .....	$4,1 \cdot 10^{11}$
Холловская подвижность свободных носителей заряда, см <sup>2</sup> /В · с .....	30

Знак коэффициента Холла положителен, что соответствует электропроводности *p*-типа.

В отсутствие подсветки приконтактных областей измерения удельного сопротивления и коэффициента Холла выполнить не удалось.

Следует отметить, что в КТ *p*-типа электропроводности присутствуют дырки двух типов: легкие и тяжелые. Поэтому под «холловской концентрацией» и «холловской подвижностью» свободных носителей заряда (см. выше) следует понимать некие эффективные значения.

Результаты исследований ВАХ в условиях подсветки через золотое покрытие (методика 2) согласуются с данными, приведенными выше.

Излучение светодиода (480 нм; 2,58 эВ) по энергии заметно превосходит ширину запрещенной зоны CdTe ( $\approx 1,5$  эВ), т. е. такое излучение, пройдя через тонкий слой золота, должно поглощаться в узких приповерхностных областях образца вблизи золотых контактов. Это обстоятельство свидетельствует в пользу того, что в рассмотренных экспериментах решающую роль играют именно приконтактные области.

### Заключение

Исследованы ВАХ образцов КТ в условиях регулируемой подсветки приконтактных областей как при непосредственном освещении белым светом (методика 1), так и при подсветке монохроматическим излучением (480 нм) через тонкий слой золота (методика 2).

Показано, что ВАХ образцов-двухполюсников (как в темноте, так и при наличии подсветки) представляют прямую линию, проходящую через начало координат.

Установлено, что освещение приконтактных областей образца приводит к уменьшению сопротивления на два—три порядка по сравнению с темновыми значениями.

Проведены измерения электрофизических параметров образца КТ по методу Ван-дер-Пау в условиях одновременной подсветки четырех приконтактных областей. Показано, что при наличии освещения удается провести измерения значения удельного электрического сопротивления и коэффициента Холла, чего нельзя было сделать в отсутствие подсветки.

### Библиографический список

1. Jaeger, H. Transition resistances of ohmic contacts to *p*-type CdTe and their time-dependent variation / H. Jaeger, E. Seipp // J. Electron. Mater. – 1981. – V. 10, N 3. – P. 605—618.
2. Brinkman, A. W. Contacts to Cd/Zn/Te/Se compounds / A. W. Brinkman // Properties of Narrow Gap Cadmium-Based Compounds. – London (UK): INSPEC, 1994. – P. 575—581.
3. Brun, D. Low resistance ohmic contact on *n*-CdTe / D. Brun, B. Daudin, E. Ligeon // Appl. Phys. Lett. – 1994. – V. 65, N 4. – P. 475—477.
4. Klevkov, Yu. V. Vliyanie passivacii poverhnosti *p*-CdTe v (NH<sub>4</sub>)<sub>2</sub>S<sub>x</sub> na vol't-ampernye harakteristiki kontaktov / Yu. V. Klevkov, S. A. Kolosov, A. F. Plotnikov // Fizika i tehnika poluprovodnikov. – 2006. – T. 40, N 9. – P. 1074—1078.
5. Klevkov, Yu. V. Elektrofizicheskie svoystva nelegirovannykh vysokomnykh polikristallov *n*-CdTe / Yu. V. Klevkov, S. A. Kolosov, A. F. Plotnikov // Tam zhe. – 2007. – T. 41, N 6. – P. 670—673.
6. Kolosov, S. A. Izmenenie spektra elektronnykh sostoyanii v polikristallicheskome *p*-CdTe v rezul'tate otnhiga v Cd i estestvennogo starenia / S. A. Kolosov, Yu. V. Klevkov, A. Yu. Klokov, V. S. Krivobok, A. I. Sharkov // Tam zhe. – 2009. – T. 43, N 11. – P. 1526—1532.
7. Kosyachenko, L. A. Osobennosti mehanizma elektroprovodnosti poluizoliruyushih monokristallov CdTe / L. A. Kosyachenko, O. L. Maslyanchuk, S. V. Mel'nichuk, V. M. Sklyarchuk, O. V. Sklyarchuk, T. Aoki // Tam zhe. – 2010. – T. 44, N 6. – P. 729—734.
8. Stafeev, V. I. Struktura i svoystva kontaktov Cd<sub>x</sub>Hg<sub>1-x</sub>Te-metal / V. I. Stafeev // Tam zhe. – 2009. – T. 43, N 5. – P. 636—639.
9. Blank, T. V. Mehanizmy protokaniya toka v omicheskikh kontaktah metall-poluprovodnik / T. V. Blank, Yu. A. Gol'dberg // Tam zhe. – 2007. – T. 41, N 11. – P. 1281—1308.
10. Belyaev, A. P. Vliyanie metoda sinteza na svoystva plenok tellurida kadmiya, sintezirovannykh v rezko neravnovesnykh usloviyah / A. P. Belyaev, V. P. Rubec, V. V. Antipov, E. O. Eremina // Tam zhe. – 2010. – T. 44, N 7. – P. 978—980.
11. Meriuc, A. V. Osobennosti svetovoi vol't-ampernoii harakteristiki dvustoronne chuvstvitel'nykh solnechnykh elementov na osnove tonkih bazovykh sloev CdTe / A. V. Meriuc, G. S. Hripunov, T. N. Shelest, N. V. Deineko // Tam zhe. – 2010. – T. 44, N 6. – P. 829—832.
12. Kolosov, S. A. Povedenie Bi v reshetke CdTe i effekt kompensacii v CdTe: Bi / S. A. Kolosov, V. S. Krivobok, Yu. V. Klevkov, A. F. Adiyatullin // Tam zhe. – 2013. – T. 47, N 4. – P. 538—545.
13. Kosyachenko, L. A. Self-compensation limited conductivity in semi-insulating indium-doped Cd<sub>0,9</sub>Zn<sub>0,1</sub>Te crystals / L. A. Kosyachenko, S. V. Melnychuk, O. L. Maslyanchuk, V. M. Sklyarchuk, O. F. Sklyarchuk, M. Fiederle, C. P. Lambropoulos // J. Appl. Phys. – 2012. – V. 112. – P. 013705.
14. Ruzin, A. Simulation of Schottky and ohmic contacts on CdTe / A. Ruzin // Ibid. – 2011. – V. 109. – P. 014509.
15. Dubecky, F. Simulation of Schottky and ohmic contacts on CdTe / F. Dubecky, M. Dubecky // Ibid. – 2012. – V. 111. – P. 026102.

Авторы выражают глубокую благодарность сотрудникам ОАО «Гиредмет» В. Н. Мерининой, Н. И. Шматову и Н. А. Смирновой за предоставленные образцы.