

**Исследование фотоэлектрических свойств образцов  
высокоомного теллурида кадмия-цинка**

*А.П. Лысенко<sup>1</sup>, В.А. Голубятников<sup>1</sup>, А.Г. Белов<sup>2</sup>, В.Е. Каневский<sup>2</sup>*

<sup>1</sup>*Национальный исследовательский университет «Высшая школа экономики»*

<sup>2</sup>*АО «Государственный научно-исследовательский и проектный институт  
редкометаллической промышленности «Гиредмет» (г. Москва)*

**Investigation of Photo-Electric Properties  
of High-Ohmic Cadmium Telluride Samples**

*A.P. Lysenko<sup>1</sup>, V.A. Golubyatnikov<sup>1</sup>, A.G. Belov<sup>2</sup>, V.E. Kanevskii<sup>2</sup>*

<sup>1</sup>*National Research University Higher School of Economics, Moscow*

<sup>2</sup>*State Scientific Center of Russian Federation Stock Company State Scientific Research and Design Institute of Rare Metal Industry  
«GIREDMET», Moscow*

Исследованы вольт-амперные и люкс-амперные характеристики образцов высокоомных полупроводниковых материалов CdTe и Cd<sub>1-y</sub>Zn<sub>y</sub>Te при комнатной температуре и различных интенсивностях подсветки, а также зависимости тока короткого замыкания и напряжения холостого хода от интенсивности излучения при облучении образцов светом с длиной волны 740 нм. Показано, что люкс-амперные характеристики образца теллурида кадмия-цинка зависят от полярности приложенного напряжения, а вольт-амперные характеристики сильно зависят от интенсивности излучения и имеют излом в начале координат. Высказано предположение о существовании в образце встроенного электрического поля, обусловленного технологическими режимами роста и отжига слитка.

*Ключевые слова:* теллурид кадмия-цинка; подсветка образцов; вольт-амперные и люкс-амперные характеристики; ток короткого замыкания; напряжение холостого хода.

The voltage-current (VC) and lux-current (LC) room temperature characteristics of high-ohmic CdTe (CT) and Cd<sub>1-y</sub>Zn<sub>y</sub>Te (CZT) samples with various illumination intensities have been investigated. The dependencies of the short-circuit current and open-circuit voltage with light intensity, when the CT and CZT-samples were illuminated by 740-nanometer red color radiation, have been also investigated. It has been shown that the lux-current characteristics of

zinc cadmium telluride sample depend on the applied voltage polarity; the voltage-current characteristics strongly depend on the light intensity and have peculiar fracture at the coordinate zero-point. It has been assumed that within the sample the introduced electric field due to the technological ingot growth and annealing conditions exists.

*Keywords:* cadmium-zinc telluride; sample illumination; voltage-current and lux-current characteristics; short-circuit current; open-circuit voltage.

**Введение.** Цель исследований фотоэлектрических свойств высокоомных полупроводников [1–7] – разработка методов контроля электрофизических параметров данных материалов. Подсветка образца, заметно изменяющая его свойства, служит инструментом для определения «темновых» параметров материала (именно они интересуют технологов-разработчиков материала). Если, например, из-за очень большого сопротивления контактов к образцу не удастся измерить «темновое» удельное электрическое сопротивление образца, то, освещая приконтактные области и тем самым повышая концентрацию свободных носителей заряда вблизи контактов, можно это сопротивление существенно снизить [6]. Тогда можно измерить значение удельного сопротивления при подсветке, а затем, проведя экстраполяцию к нулевой интенсивности освещения, определить интересующее «темновое» значение. То же самое относится к измерениям концентрации и подвижности свободных носителей заряда – важнейших параметров любого полупроводникового материала.

Предпринятые ранее исследования доказали, что экстраполяция к нулевой освещенности дает вполне адекватные результаты [2, 5]. На примере полуизолирующего арсенида галлия в [5] показано, что значения параметров оказались близкими к результатам независимых измерений. Получены и нетривиальные результаты: оказалось, что необязательно подсвечивать приконтактные области образца. Подсветка любой его части приводит к снижению сопротивления омических контактов и изменению проводимости всего образца [6].

В настоящей работе исследовано влияние локальной засветки на электрические свойства образцов высокоомного теллурида кадмия и теллурида кадмия-цинка.

**Методика эксперимента.** В условиях подсветки излучением от красного светодиода исследовались образцы двух типов высокоомных полупроводников: теллурида кадмия CdTe (КТ) и теллурида кадмия-цинка  $Cd_{1-y}Zn_yTe$  (КЦТ).

Технологические режимы получения слитков КТ и КЦТ, из которых впоследствии вырезались исследуемые образцы, принципиально отличались друг от друга. Слитки КТ получены методом движущегося нагревателя (Traveling Heater Method – ТНМ) и легированы хлором (соединение  $CdCl_2$  добавлялось в шихту). При росте слитка хлор (мелкая донорная примесь) входит в него неравномерно. Часть слитка, где хлора мало, имеет электропроводность *p*-типа и низкоомна за счет собственных электрически активных дефектов. Другая часть слитка, где хлора оказалось много, также низкоомна, но имеет электропроводность *n*-типа. Средняя область слитка, где собственные дефекты компенсировались легирующей примесью (хлором), высокоомна. Именно из нее и вырезались исследуемые образцы.

Слитки КЦТ, полученные методом Бриджмена, специально ничем не легировались. Электрические свойства этих слитков определялись только ансамблем собственных электрически активных дефектов, концентрация и распределение которых по слитку зависели от конкретных условий его роста и отжига.

Измерения проводились при комнатной температуре. Образцы представляли собой плоскопараллельные пластины, имеющие форму квадрата со стороной 10 мм, толщины образцов составляли 1–3 мм. Перед проведением измерений рабочие поверхности образцов подвергались вначале механической, а затем химико-механической полировке с использованием полирующих травителей. Контакты припаивались сверху на рабочие грани по углам образцов. В качестве контактного материала использовался индий марки 00 или 000.

Для подсветки применялся светодиод марки EDEF-1LS3 с длиной волны излучения 740 нм (1,67 эВ). Подсветка проводилась либо в центральной части образца через диафрагмы – тонкие сменные пластины с круглыми отверстиями различных диаметров (рис.1,а), либо вблизи контактов (рис.1,б). Светлые области на рисунке – места засветки. При измерениях можно задействовать любую пару контактов образца. В рассматриваемом случае включался образец по диагонали с использованием контактов 1–3, а также 2–4. Изменение интенсивности подсветки осуществлялось путем регулирования тока через светодиод, который изменялся в пределах 0–300 мА. Интенсивность излучения светодиода прямо пропорциональна току через него, что проверялось с помощью фотодиода при токе через светодиод  $I_{св} \geq 10$  мА.

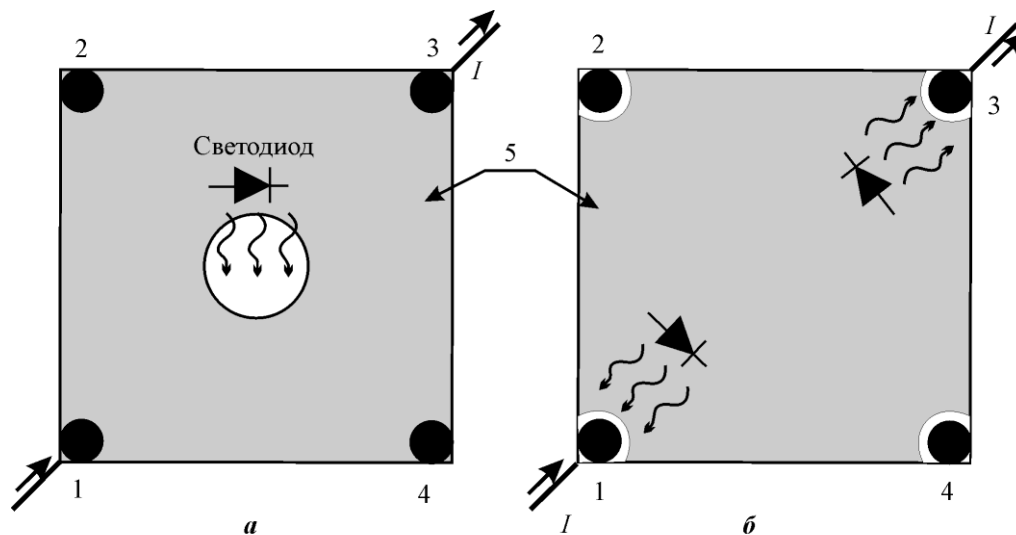


Рис.1. Схема эксперимента: 1–4 – индиевые контакты; 5 – светомаскирующее диэлектрическое покрытие

Для подсветки приконтактных областей образца использовались аналогичные светодиоды по одному на каждый контакт. Их можно включать в любых сочетаниях. Если в эксперименте использовалось более одного диода, то они включались последовательно.

Исследовались вольт-амперные характеристики (ВАХ) между контактами 1–3 и 2–4 без подсветки и при подсветке. ВАХ регистрировались в диапазоне напряжений  $\pm 30$  В. Исследовались люкс-амперные характеристики (ЛАХ) – зависимость тока через выbranную пару контактов при фиксированном внешнем смещении (в рассматриваемом случае 10 В) от интенсивности света, падающего на засвечиваемую область, т.е. от тока через задействованные светодиоды. Индексы в обозначении тока указывают его направление. Снимались зависимости напряжения холостого хода  $U_{х.х}$  и тока короткого замыкания  $I_{к.з}$  для различных пар контактов от интенсивности подсветки, т.е. от тока через светодиод  $I_{сд}$ . При измерениях тока короткого замыкания рабочая пара контактов

образца закорачивалась через амперметр. Из-за высокого внутреннего сопротивления образца напряжение холостого хода измерялось методом компенсации по нулевому значению тока через образец.

**Экспериментальные результаты и их обсуждение.** ВАХ образцов КТ между любыми парами контактов линейны и симметричны как без подсветки, так и при подсветке. В этом отношении образец теллурида кадмия ничем не отличался от исследованного ранее полуизолирующего арсенида галлия [4]. Аналогичные данные получены и для ЛАХ характеристик этого образца.

Совсем иначе реагировал на подсветку образец КЦТ. ВАХ образца оказалась несимметричной (рис.2) как без подсветки, так и при подсветке. Хотя индиевые контакты для этого материала, как правило, обеспечивают линейную ВАХ, в данном случае ВАХ между любыми парами контактов оказалась линейной, но несимметричной. В отсутствие подсветки ВАХ проходит через начало координат. Вследствие возникновения вентильной фотоЭДС, что является прямым свидетельством встроенного электрического поля, при подсветке ВАХ смещается по оси напряжений (на рисунке этого смещения в выбранном масштабе не видно).

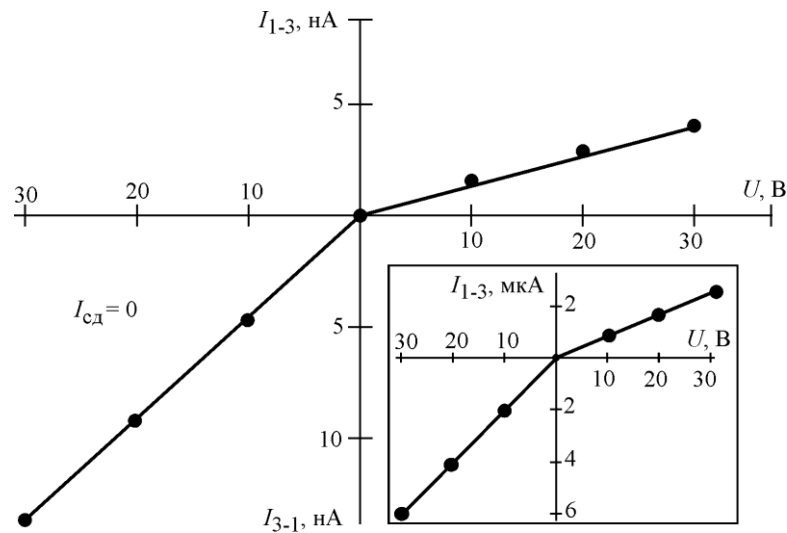


Рис.2. Темновая ВАХ между контактами 1 и 3. На вставке – ВАХ при подсветке центральной части образца (диаметр диафрагмы  $d = 4$  мм,  $I = 300$  мА)

Для образцов КЦТ ЛАХ выглядят совсем иначе: они чувствительны к направлению тока. На рис.3 приведен пример таких характеристик, измеренных при подсветке в центре образца (см. рис.1,а).

В первом приближении ЛАХ между любыми парами контактов (см. рис.3) при достаточно большой освещенности (при  $I_{cd} > 100$  мА) становится линейной функцией тока светодиода. На линейном участке эта зависимость описывается уравнением [4]:

$$I = k I_{cd} + I_{отс}, \quad (1)$$

где  $k$  – угловой коэффициент;  $I_{отс}$  – ток отсечки, равный  $U/R_{об}$ ;  $U$  – приложенное напряжение;  $R_{об}$  – объемное сопротивление образца.

В работе [4] предложена качественная модель, объясняющая экспериментальные результаты. Суть модели сводится к тому, что какой бы участок образца ни подсвечивали, концентрация избыточных основных носителей заряда меняется во всем образце пропорционально интенсивности излучения, падающего на засвечиваемый участок по-

верхности образца. Этот парадоксальный вывод подтвержден экспериментально на образце полуизолирующего арсенида галлия с помощью измерения ЭДС Холла.

Коэффициент  $k$  в (1), в свою очередь, пропорционален напряженности электрического поля в зоне засветки. Тогда из анализа рис.3 можно сделать вывод, что напряженность электрического поля в зоне засветки для всех случаев различна. В то же время, учитывая симметрию образца и постоянство внешнего смещения, следует полагать внешнее поле одинаковым для всех четырех случаев. Следовательно, различие в угловых коэффициентах можно объяснить только наличием внутреннего (встроенного) электрического поля.

Можно ожидать, что и в отсутствие внешнего смещения встроенное поле будут разделять неравновесные носители заряда и, соответственно, наблюдаться ток короткого замыкания и напряжение холостого хода.

Действительно, при подсветке центральной части образца материала КЦТ на любых парах контактов наблюдалось напряжение холостого хода. На образцах КТ это явление отсутствует. На рис.4 для примера приведены зависимости  $U_{x,x}$  от тока через светодиод  $I_{cd}$  при различных диаметрах диафрагмы. На начальном участке данной зависимости  $U_{x,x}$  быстро увеличивается с ростом  $I_{cd}$ , затем зависимость становится более плавной, а в интервале  $I_{cd} \geq 100$  мА напряжение холостого хода практически перестает зависеть от тока через светодиод. Качественно подобные зависимости аналогичны наблюдаемым на обычных вентильных фотоэлементах. Однако тот факт, что максимальное значение  $U_{x,x}$  зависит от диаметра диафрагмы, требует дополнительного осмысления.

На рис.5 приведены зависимости напряжения холостого хода  $U_{x,x}$  от диаметра диафрагмы  $d$ , измеренные при  $I_{cd} = 300$  мА (образец включен по разным диагоналям). В первом приближении зависимости линейны. Это можно объяснить тем, что разделение электронно-дырочных пар, рождаемых излучением, происходит только в зоне освещения. И если встроенное электрическое поле в освещаемой области однородно, то набегающая на расстоянии диаметра диафрагмы разность потенциалов как раз и будет линейно зависеть от диаметра. Напряжение холостого хода по диагонали 1–3 больше, чем по диагонали 2–4 при одном и том же диаметре диафрагмы. Это свидетельствует о том, что составляющая напряженности встроенного электрического поля по диагонали 1–3 больше, чем по диагонали 2–4 (см. рис.1).

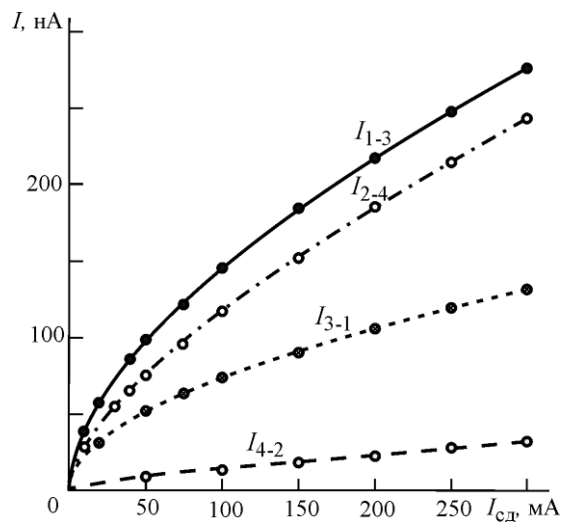


Рис.3. ЛАХ образца КЦТ при  $d = 1$  мм

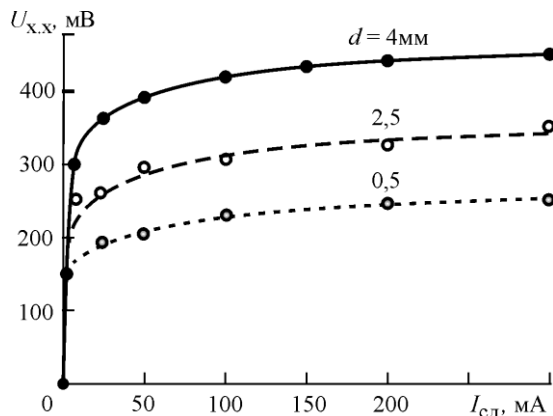


Рис.4. Зависимости напряжения холостого хода по диагонали 2–4 от интенсивности падающего света при разных диаметрах диафрагмы для образца КЦТ

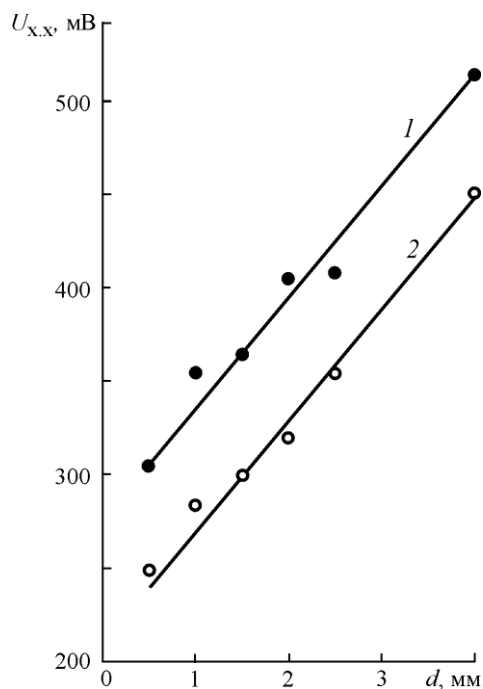


Рис.5. Зависимость напряжения холостого хода от диаметра диафрагмы при максимальной освещенности для образца КЦТ: 1 – задействованы контакты 1–3; 2 – контакты 2–4

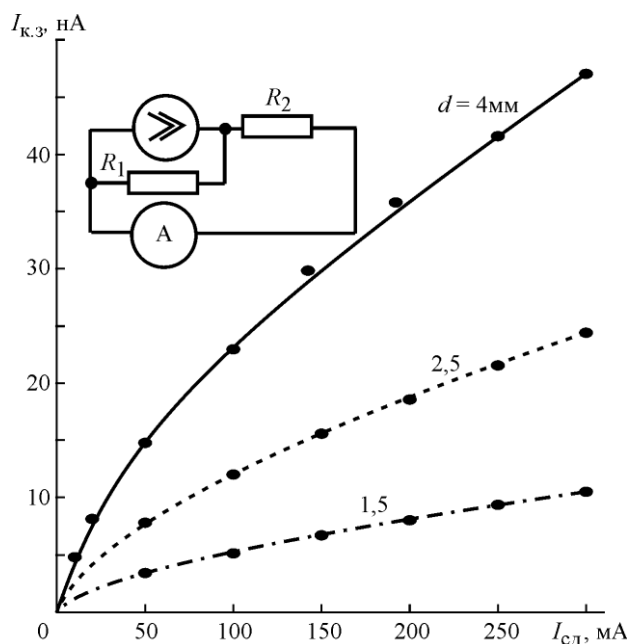


Рис.6. Зависимости тока короткого замыкания от тока через светодиод для образца КЦТ при разных диаметрах диафрагмы (задействованы контакты 1–3)

На рис.6 приведены зависимости тока короткого замыкания  $I_{к.з}$  от тока через светодиод  $I_{сд}$  для образца КЦТ. Параметром семейства является диаметр диафрагмы. Однако ток короткого замыкания вентильного элемента в первом приближении должен линейно зависеть от интенсивности падающего света. В рассматриваемом случае наблюдается сублинейная зависимость, что можно объяснить наличием очень большого последовательного сопротивления  $R_2$  в цепи фотоэлемента (см. эквивалентную схему на рис.6) [7]. Это сопротивление объема образца. На эквивалентной схеме фотоэлемент изображен в виде генератора тока, ток которого линейно растет с интенсивностью падающего света. Генератор тока шунтирован сопротивлением  $R_1$  освещаемой зоны кристалла, причем значение сопротивления уменьшается с ростом интенсивности светового потока.

На образце КТ ток короткого замыкания не наблюдался ни на какой паре контактов.

Полученные экспериментальные результаты однозначно свидетельствуют о наличии в исследуемом образце КЦТ встроенного электрического поля, которое никак не связано с контактами. Об этом свидетельствует линейность ВАХ. Несимметричность ВАХ может быть обусловлена именно встроенным объемным электрическим полем.

Для определения размера и границ электрического кластера планируется проведение эксперимента по сканированию поверхности образца световым зондом. Для проверки, распространяется ли встроенное поле до контактных площадок, использовалась схема эксперимента, приведенная на рис.1,б. В таблице представлены значения  $I_{к.з}$  и  $U_{x,x}$  для различных пар контактов того же образца. Относительная погрешность измерения параметров не превышает  $\pm 10\%$  (оценка с завышением).

**Значения токов короткого замыкания и напряжений холостого хода при подсветке контактов в различных сочетаниях**

Условия освещения ( $I_{сд}=300$ мА)	Номер включенного светодиода					
	1	3	2	4	1 и 3	2 и 4
$I_{к.з. 1-3}$ , нА	1,1	6,1	3,0	3,1	6,6	5,4
$I_{к.з. 2-4}$ , нА	1,2	1,0	0,38	4,7	2,0	6,8
$U_{х.х. 1-3}$ , мВ	170	320	300	300	210	340
$U_{х.х. 2-4}$ , мВ	130	120	110	170	150	170

*Примечание.* Нумерация светодиодов соответствует номерам контактов.

Из данных таблицы видно, что встроенное поле сильно неоднородно по образцу. Следует отметить, что поля вблизи контактных площадок не являются по своей природе контактными ввиду их существенного разброса и линейности ВАХ. Утверждать, что эти поля принадлежат тому же кластеру, что и в центре образца, на основании имеющихся данных нельзя.

Относительно природы встроенного поля можно лишь высказать некоторые предположения. Поскольку при выращивании слитков КЦТ шихта специально не легировалась, электрические свойства исследованного образца обусловлены собственными точечными дефектами. Большая часть собственных дефектов электрически активна, а их концентрация зависит от условий выращивания и отжига слитка. Например, при быстром охлаждении слитка до комнатной температуры происходит «закалка», в результате которой возможно образование макроскопических кластеров. В таких областях концентрации собственных дефектов могут заметно отличаться друг от друга, что и приводит к сильной электрической неоднородности. Этот вопрос является предметом самостоятельного исследования.

Отметим, что неясно, какую роль во всех рассматриваемых эффектах играет цинк. Он вводится в шихту для улучшения механических свойств будущего слитка и не должен изменять электрические свойства вещества (цинк – изоэлектронная примесь). Вместе с тем следует принимать во внимание, что цинк, который входит в слиток неравномерно, может влиять на распределение точечных дефектов, изменяя тем самым электрические свойства материала.

Поскольку рассматриваемые полупроводники чаще всего используются в качестве материалов для детекторов ионизирующих излучений, наличие встроенных полей, безусловно, является недостатком. Поэтому для совершенствования технологии выращивания слитков КЦТ необходима методика, позволяющая выявлять наличие таких полей.

**Заключение.** Проведенные исследования показали, что в образцах теллурида кадмия-цинка наблюдаются кластеры со встроенным электрическим полем, а в теллуриде кадмия, легированном хлором, встроенных полей нет. Имеющаяся информация не позволяет установить, с чем именно связано наличие встроенных электрических полей в исследованных образцах КЦТ: с цинком или только с ансамблем собственных дефектов. Для этого требуются дополнительные исследования.

Результаты измерений зависимости тока короткого замыкания от интенсивности подсветки для образцов КТ и КЦТ показали, что ток короткого замыкания для КТ пренебрежимо мал по сравнению с аналогичными значениями для образца КЦТ. При включении образца КЦТ по разным диагоналям токи короткого замыкания заметно различаются.

Выявлено, что ЛАХ сильно зависят от полярности приложенного внешнего напряжения, ВАХ – от тока через светодиод и имеют излом вблизи начала координат.

Анализ зависимости напряжения холостого хода от тока через светодиод для образца КЦТ показал, что при малых уровнях подсветки напряжение холостого хода быстро увеличивается (по модулю) с ростом тока через светодиод, а затем эта зависимость выходит «на насыщение». Максимальные значения напряжения холостого хода пропорциональны диаметру отверстия.

### *Литература*

1. Снижение переходного сопротивления омических контактов к высокоомным полупроводникам с помощью оптического излучения/ *В.А. Голубятников, Ф.И. Григорьев, А.П. Лысенко и др.* // Заводская лаборатория. Диагностика материалов. – 2014. – Т. 80. – № 1. – С. 35–38.
2. Применение подсветки контактов для измерений проводимости высокоомных полупроводников/ *В.А. Голубятников, Ф.И. Григорьев, А.П. Лысенко и др.*// Приборы и техника эксперимента. – 2014. – № 3. – С. 93–96.
3. Модификация метода Ван дер Пау для измерения электрофизических параметров высокоомных полупроводников / *А.Г. Белов, В.А. Голубятников, Ф.И. Григорьев и др.* // Приборы и техника эксперимента. – 2014. – № 5. – С. 115–119.
4. Specific features of the photoconductivity of semi\_insulating cadmium telluride / *V.A. Golubyatnikov, F.I. Grigor'ev, A.P. Lysenko et al.*// Semiconductors. – 2014. – Vol. 48. – N. 13. – P. 1700–1703.
5. *Лысенко А.П., Голубятников В.А., Белов А.Г., Строганкова Н.И.* Влияние размера области засветки образца высокоомного арсенида галлия на его проводимость // Изв. вузов. Электроника. – 2015. – Т. 20. – №2. – С. 174–181.
6. *Гаман В.И.* Физика полупроводниковых приборов: учеб. пособие. –Томск: Изд-во НТЛ, 2000. – 426 с.
7. *Пасынков В.В., Чиркин Л.К.* Полупроводниковые приборы. – СПб.: Лань, 2003. – 480 с.

Статья поступила  
24 сентября 2015 г.

*Лысенко Александр Павлович* – доктор технических наук, профессор департамента электронной инженерии МИЭМ НИУ ВШЭ. *Область научных интересов:* физика полупроводников и полупроводниковых приборов. **E-mail:** [aplysenko@hse.ru](mailto:aplysenko@hse.ru)

*Голубятников Вадим Александрович* – ведущий электроник департамента электронной инженерии МИЭМ НИУ ВШЭ. *Область научных интересов:* электроника, физика полупроводников и полупроводниковых приборов.

*Белов Александр Георгиевич* – кандидат технических наук, старший научный сотрудник АО «Гиредмет» (г. Москва). *Область научных интересов:* физика полупроводниковых материалов.

*Каневский Владимир Евгеньевич* – кандидат технических наук, старший научный сотрудник АО «Гиредмет» (г. Москва). *Область научных интересов:* физика полупроводниковых материалов, обеспечение качества полупроводниковых материалов, метрология, стандартизация.