

## Особенности фотопроводимости полуизолирующего теллурида кадмия

*В.А. Голубятников<sup>1</sup>, Ф.И. Григорьев<sup>1</sup>, А.П. Лысенко<sup>1</sup>,  
Н.И. Строганкова<sup>1</sup>, М.Б. Шадов<sup>1</sup>, А.Г. Белов<sup>2</sup>*

*<sup>1</sup>Московский институт электроники и математики Национального  
исследовательского университета «Высшая школа экономики»*

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

Исследовано влияние локальной засветки, обеспечивающей высокий уровень инжекции свободных носителей заряда, на проводимость образца полуизолирующего теллурида кадмия и на свойства омических контактов к образцу. Обнаружено, что независимо от области засветки снижается значение переходного сопротивления омических контактов и пропорционально интенсивности облучения в образце растет концентрация основных носителей заряда. Показано, что с помощью сканирования световым зондом можно исследовать врожденные неоднородности кристаллов полуизолирующих полупроводников.

*Ключевые слова:* полуизолирующий теллурид кадмия, омические контакты, засветка образца, концентрация свободных носителей заряда, световой зонд.

Создание качественных омических контактов к полупроводникам, особенно высокоомным, является важной технической и научной задачей. В случае линейной вольт-амперной характеристики (ВАХ) контакта его переходное сопротивление [1–3] может быть настолько большим, что делает невозможным использование этого контакта в изготовлении как твердотельных приборов, так и измерительных образцов для исследования электрофизических параметров полупроводников. На практике проблема изготовления линейных контактов с маленьким переходным сопротивлением сводится к подбору сложных соединений и технологий их нанесения для каждого конкретного материала. Такой подход имеет хорошие результаты в технологии изготовления приборов. Для проведения исследовательских работ желательно иметь методику, позволяющую измерять параметры различных высокоомных полупроводников, исключив при этом влияние сопротивления контактов на результаты измерений. Как правило, для снижения влияния контактов на результаты измерений используют четырехзондовые методы. Однако в случае высокоомных полупроводников для экспресс-анализа эти методы малопригодны. Чаще всего удельное сопротивление таких материалов оценивают по ВАХ двухполюсника [4]. При этом ошибка измерения удельного сопротивления может оказаться непредсказуемо большой.

© В.А. Голубятников, Ф.И. Григорьев, А.П. Лысенко, Н.И. Строганкова, М.Б. Шадов, А.Г. Белов, 2014

Один из способов снижения переходного сопротивления контактов – создание неравновесных носителей в области контакта. В настоящей работе исследовано влияние освещения на свойства омических контактов к детекторному теллуриду кадмия и его проводимость.

**Влияние освещения на свойства омических контактов. Эксперимент.** Для исследования влияния освещения на свойства омических контактов на пластину полупроводника на расстоянии 15 мм друг от друга наносились два одинаковых омических контакта диаметром 1 мм. Конструкция контакта показана на рис.1.

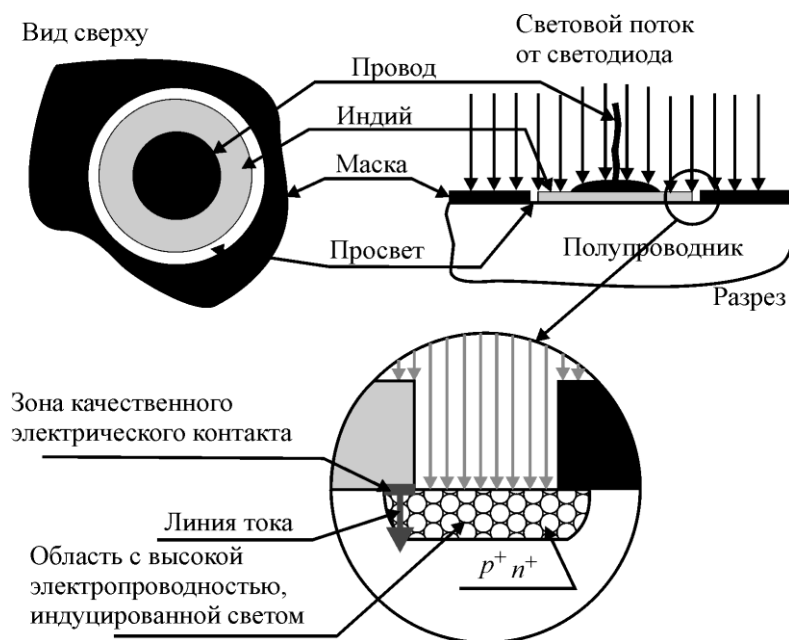


Рис.1. Конструкция исследуемого контакта

На поверхность образца теллурида кадмия (CdTe) наносился слой индия, к которому для включения образца в электрическую цепь присоединялся (припаивался) электрический провод. Вся поверхность образца, кроме области контакта, закрывалась маской, не проводящей электрический ток и не пропускающей свет. Такая маска может быть изготовлена, например, из черной бумаги. Между краями контакта и маски оставлен просвет порядка 1 мм. Источниками света служили два светодиода EDEF-1LS3 (по одному на каждый контакт), генерирующих свет с энергией квантов, превышающей ширину запрещенной зоны теллурида кадмия (длина волны излучения в максимуме равна 740 нм). Интенсивность излучения светодиодов контролировалась по величине прямого тока через них. Светодиоды соединялись последовательно. Возникшие при освещении неравновесные электронно-дырочные пары диффундировали от засвеченной области на расстояние диффузионной длины  $L_{\text{диф}}$  во все стороны. Часть электронно-дырочных пар, возникших на расстоянии меньше диффузионной длины от края контакта, попадали в подконтактную зону. В результате внешний край металлического контакта шириной  $L_{\text{диф}}$  контактировал по всему периметру уже не с высокоомным слоем, а с областью, обогащенной носителями заряда, где и должна возникать зона качественного электрического контакта.

Предполагается, что обогащенная носителями заряда область с высокой электропроводностью, с одной стороны контактируя с кромкой металлического контакта, а с

другой – с объемом образца, должна шунтировать большое переходное сопротивление той части контакта, куда не попали неравновесные носители заряда.

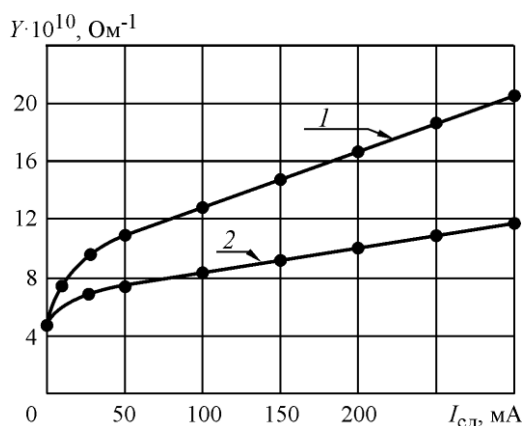


Рис. 2. Зависимость проводимости двухполюсника от тока через светодиоды: 1 – включены оба светодиода, 2 – включен один светодиод

ления структуры, только эффект при этом практически вдвое меньше. Это означает, что освещение маленьких приконтактных областей влияет не только на переходное сопротивление этих контактов, но и на проводимость самого полупроводника. В результате полученных данных можно предположить, что от места локальной засветки эффект снижения сопротивления двухполюсника может практически не зависеть.

**Влияние локальной засветки на фотопроводимость. Эксперимент.** Для проведения исследований использовался образец полуизолирующего теллурида кадмия  $p$ -типа электропроводности с удельным электрическим сопротивлением  $\rho \geq 10^7 \text{ Ом} \cdot \text{см}$  при комнатной температуре. Слиток, из которого вырезался образец, выращивался вертикальным методом Бриджмена и состоял из нескольких монокристаллических блоков. Слиток специально не легировался. Монокристаллические блоки с помощью алмазного диска разрезались на пластины толщиной около 4 мм. Пластины подвергались вначале механической полировки, а затем – химико-механической полировке с использованием полирующего травителя  $\text{Br}_2\text{--HBr}$ –этиленгликоль (0,1:1,0:1,2). Далее из пластины вырезался образец в форме прямоугольного параллелепипеда размером  $3 \times 3 \times 23 \text{ мм}$ . На торцы образца наносились индиевые контакты, обеспечивающие линейную ВАХ двухполюсника в интервале напряжений  $\pm 10 \text{ В}$ . Для засветки использовался лазерный диод LD-63153TL на длину волны 635 нм мощностью 15 мВт. Образец сканировался световым пятном по длине образца (рис. 3).

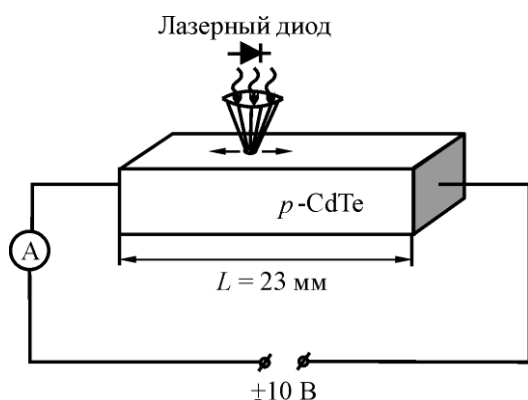


Рис. 3. Сканирование образца лазерным лучом

На рис. 2 приведена зависимость проводимости исследуемого двухполюсника от интенсивности света, контролируемой по величине прямого тока через светодиоды при постоянном напряжении на образце, равном 10 В. Можно предположить, что с ростом интенсивности облучения сопротивление контактов станет меньше объемного сопротивления и зависимость общего сопротивления двухполюсника выйдет на насыщение, определяемое объемом полупроводника.

Действительно, при облучении контактов сопротивление двухполюсника существенно снижается, однако на насыщение не выходит. Более того, засветка одного контакта приводит к снижению общего сопротив-

ления. Это означает, что освещение маленьких приконтактных областей влияет не только на переходное сопротивление этих контактов, но и на проводимость самого полупроводника. В результате полученных данных можно предположить, что от места локальной засветки эффект снижения сопротивления двухполюсника может практически не зависеть.

Для получения значения фототока  $\Delta I$  темновой ток вычитался из общего тока через образец. Для того чтобы исключить неконтролируемое изменение темнового тока, его значение измерялось после каждого выключения лазера.

**Обсуждение экспериментальных результатов.** Свет воздействует не только на переходное сопротивление контактов, но и на объемное сопротивление образца, так как проводимость двухполюсника не выходит на насыщение, а продолжает расти с увеличением интенсивности света. Отметим, что зависимость проводимости от интенсивности падающего света становится линейной при большой освещенности. Начальный (нелинейный) участок кривой  $Y(I_{сд})$  можно интерпретировать как результат снижения переходных сопротивлений контактов, снижающихся даже при освещении только одного контакта. В области больших интенсивностей зависимость  $Y(I_{сд})$  становится линейной, что свидетельствует об увеличении концентрации свободных носителей заряда во всем образце. Данный вывод согласуется с результатами эксперимента по сканированию образца (см. рис.3) лазерным лучом, представленными на рис.4. Во-первых, фототок через образец-двухполюсник заметно изменяется даже при маломощной и очень ограниченной засветке. Во-вторых, эффект очень чувствителен к положению лазерного луча и, в-третьих, – к полярности приложенного внешнего напряжения. Освещение даже малой области образца в любой его части приводит к изменению полной проводимости образца. Такой эффект можно объяснить, предположив, что при освещении любой части образца концентрация свободных носителей заряда увеличивается во всем объеме образца.

Для объяснения экспериментальных результатов воспользуемся качественной моделью, которая относится к любому высокоомному полупроводнику. На рис.5 модель проиллюстрирована на примере образца  $p$ -CdTe. Очевидно, что в отсутствие тянущего электрического поля генерированные светом электронно-дырочные пары диффундируют совместно на диффузионную длину электронов (исследуемый образец имеет электропроводность  $p$ -типа), т.е. практически остаются в пределах освещаемой области. Если в образце есть электрическое поле, то электроны и дырки разделяются. Дырки как основные носители заряда дрейфуют к отрицательному полюсу образца без рекомбинации. Электроны, двигаясь в противоположную сторону, притягивают к себе из объема кристалла, а в конечном счете из внешней цепи дырки – основные носители. На расстоянии эффективной диффузионной длины электроны рекомбинируют и в результате весь ток через образец переносится избыточными дырками. Аналогичная ситуация наблюдается в высоковольтных диодах при высоком уровне инжекции [5]. При этом ток, создаваемый этими избыточными носителями заряда в дополнение к темновому току, можно определить из соотношения

$$\Delta I = \Delta p \mu E, \quad (1)$$

где  $\Delta p$  – количество электронно-дырочных пар, создаваемых светом в единицу времени;  $\mu$  – подвижность основных носителей заряда;  $E$  – локальная напряженность электрического поля.

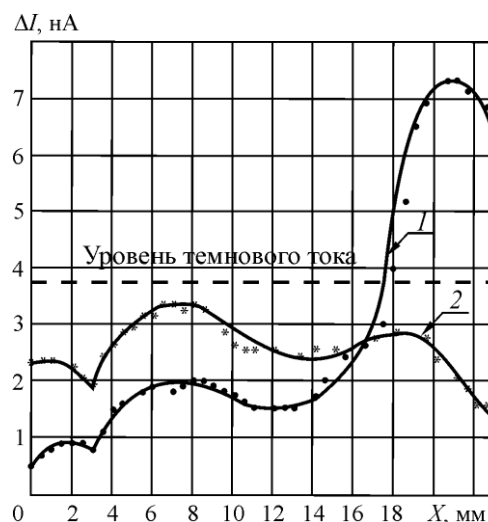


Рис.4. Зависимость фототока через исследуемый образец от координаты светового зонда при разных полярностях внешнего напряжения: 1 – «плюс» на левом контакте; 2 – «плюс» на правом контакте ( $U = 10$  В)

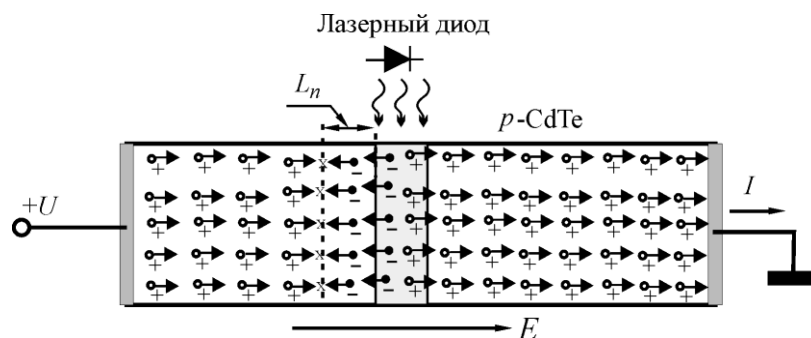


Рис.5. Качественная модель возникновения избыточного количества основных носителей заряда во всем объеме кристалла при локальной засветке

Как видно из соотношения (1), фототок будет зависеть от напряженности электрического поля в зоне облучения и от количества избыточных носителей заряда, которое прямо пропорционально интенсивности излучения (подвижность будем считать не зависящей от интенсивности излучения). Тогда зависимость  $\Delta I(X)$  при постоянной мощности лазера фактически должна повторять зависимость  $E(X)$ , а площадь под кривой будет пропорциональна приложенному напряжению, которое в процессе проведения измерений остается неизменным. В свою очередь,  $E(X)$  будет зависеть от распределения удельного электрического сопротивления по образцу и от наличия в образце областей с внутренними встроенными электрическими полями. Сильная асимметрия зависимостей  $\Delta I(X)$ , относящихся к разным полярностям внешнего напряжения, указывает на наличие такой области в правой части образца (см. рис.4). В левой части образца ( $X \leq 16$  мм) характер зависимостей  $\Delta I(X)$  одинаков при обеих полярностях внешнего напряжения. Немонотонность кривых вдоль оси абсцисс свидетельствует о наличии неоднородностей удельного электрического сопротивления. В правой части образца зависимости  $\Delta I(X)$  для разных полярностей внешнего напряжения заметно отличаются друг от друга. Поскольку площади под кривыми 1 и 2 должны быть одинаковыми (внешнее напряжение постоянно), резкий рост кривой 1 в области ( $16 \leq X \leq 22$  мм) должен сопровождаться уменьшением значений  $\Delta I(X)$  в левой части образца.

Наблюдаемый эффект можно объяснить, если предположить, что в правой части исследуемого образца существует некая область со встроенным электрическим полем. Тогда при одной полярности внешнего напряжения внутреннее поле будет складываться с внешним, а при обратной полярности – вычитаться. Соответственно в первом случае фототок будет больше, а во втором – меньше.

Для проверки этой гипотезы необходимо провести независимые измерения, которые подтвердят (или опровергнут) наличие встроенного электрического поля. Если такое встроенное поле действительно существует, то сканирование образца тонким световым зондом совместно с измерением тока через образец позволит исследовать электрические неоднородности в образцах высокоомных полупроводниковых материалов.

Относительно природы встроенного поля можно высказать некоторые предположения. Поскольку 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 дальнейших исследований.

В результате исследования зависимости проводимости образца полуизолирующего теллурида кадмия  $p$ -типа электропроводности от тока через светодиоды при засветке приконтактных областей излучением с энергией кванта, превышающей ширину запрещенной зоны исследуемого материала, установлено, что, хотя проводимость образца увеличивается в несколько раз, данные зависимости не выходят на насыщение.

Исследование образцов высокоомного теллурида кадмия  $p$ -типа электропроводности при сканировании лазерным лучом вдоль образца при различных полярностях внешнего напряжения показало, что зависимости фототока от координаты лазерного луча при двух полярностях внешнего напряжения заметно отличаются друг от друга. Это может быть связано с наличием в образце встроенного электрического поля.

Предложенная качественная модель описывает полученные экспериментальные данные. Наблюдаемые явления могут быть объяснены, если предположить, что засветка приконтактных областей образца увеличивает концентрацию основных носителей заряда не только в этих областях, но и во всем объеме образца.

### **Литература**

1. **Бланк Т.В., Гольдберг Ю.А.** Механизм протекания тока в омических контактах металл–полупроводник // ФТП. – 2007. – Т. 41. – Вып. 11. – С. 1281–1308.
2. **Ковалев А.Н.** Современные методы усовершенствования полевых AlGaIn/GaN-гетеротранзисторов // Изв. вузов. Материалы электронной техники. – 2007. – № 2. – С. 4–17.
3. Особенности механизма электропроводности полуизолирующих монокристаллов CdTe / **Л.А. Коссяченко, О.Л. Масляничук, С.В. Мельничук и др.** // ФТП. – 2010. – Т. 44. – Вып. 6. – С. 729–734.
4. **Махний В.П.** Полуизолирующие слои теллурида кадмия // Журнал технической физики. – 2005. – Т. 75, Вып. 11. – С. 122–123.
5. **Викулин И.М., Стафеев В.И.** Физика полупроводниковых приборов. – М.: Советское радио, 1980. – С. 22.

Статья поступила 3 октября 2013 г.

**Голубятников Вадим Александрович** – ведущий электроник кафедры электроники и нанoeлектроники МИЭМ НИУ ВШЭ. *Область научных интересов:* электроника, физика полупроводников и полупроводниковых приборов.

**Григорьев Федор Иосифович** – кандидат химических наук, профессор кафедры электроники и нанoeлектроники МИЭМ НИУ ВШЭ. *Область научных интересов:* физика полупроводников и полупроводниковых приборов.

**Лысенко Александр Павлович** – доктор технических наук, профессор кафедры электроники и нанoeлектроники МИЭМ НИУ ВШЭ. *Область научных интересов:* физика полупроводников и полупроводниковых приборов.  
**E-mail:** aplysenko@hse.ru

**Строганкова Наталия Ильинична** – кандидат технических наук, доцент кафедры электроники и нанoeлектроники МИЭМ НИУ ВШЭ. *Область научных интересов:* физика полупроводников и полупроводниковых приборов.

**Шадов Мухаммед Барасбиевич** – инженер кафедры электроники и нанoeлектроники МИЭМ НИУ ВШЭ. *Область научных интересов:* физика полупроводников и полупроводниковых приборов.

**Белов Александр Георгиевич** – кандидат технических наук, старший научный сотрудник ОАО «Государственный научно-исследовательский и проектный институт редкометаллической промышленности «ГИРЕДМЕТ» (г. Москва). *Область научных интересов:* физика полупроводниковых материалов.