

06

Особенности электрических характеристик диодов Шоттки на основе CdTe с почти собственной проводимостью

© Л.А. Косяченко, В.М. Склярчук, О.Л. Маслянчук, Е.В. Грушко,
В.А. Гнатюк, Т. Aoki, Y. Hatanaka

Черновицкий национальный университет, Черновцы, Украина
Институт физики полупроводников им. В.Е. Лашкарева НАНУ,
Киев, Украина

Research Institute of Electronics, Shizuoka University, Hamamatsu, Japan
Aichi University of Technology, Gamagouri, Aichi 433 0047, Japan
E-mail: lakos@chv.ukrpack.net

Поступило в Редакцию 28 июня 2006 г.

Исследованы диоды Шоттки, полученные вакуумным напылением Al на CdTe со слабо выраженным p -типом проводимости ($\rho > 10^9 \Omega \cdot \text{cm}$ при комнатных температурах). Диоды демонстрируют невыпрямляющую линейную вольт-амперную характеристику при напряжениях $|V| < 3-5 \text{ V}$ и в то же время фото э.д.с., составляющую 0.28–0.3 V, что объясняется особенностями механизма переноса заряда, обусловленными большим сопротивлением объемной части диодной структуры. Понижение этого сопротивления при облучении фотонами с подходящим коэффициентом поглощения трансформирует вольт-амперную характеристику, которая становится типичной для полупроводникового диода. Результаты расчета в рамках теории Саа–Нойса–Шокли с учетом особенностей используемого материала согласуются с результатами эксперимента.

PACS: 29.40.w, 07.85.F

Введение. Теллурид кадмия (CdTe) широко используется в детекторах рентгеновского и γ -излучения различного назначения. Замена Si и Ge этим полупроводником значительно расширяет чувствительность детектора в области большей энергии квантов и обеспечивает его работу без криогенного охлаждения. Применение в детекторе CdTe предполагает высокое удельное сопротивление материала, а значит его высокую чистоту и совершенство кристаллической структуры. Эти требования в значительной степени ослабляются, если один из омических контактов к CdTe заменить контактом Шоттки [1–3]. Бесспорным преимуществом

CdTe детекторов с диодом Шоттки являются исключительно малые темновые токи и благоприятные условия собирания заряда, генерированного при поглощении высокоэнергетического кванта.

Несмотря на достигнутые столь значительные технические успехи [1–3], ряд физических вопросов относительно свойств диода Шоттки, изготовленного на CdTe с почти собственной проводимостью, остаются невыясненными. Ниже представлены результаты исследования, объясняющие, почему CdTe структура, содержащая диод Шоттки, имеет невыпрямляющую, почти линейную вольт-амперную характеристику. Учет выявленных особенностей переноса заряда необходим для интерпретации эффективности детектирования и других важнейших характеристик прибора.

Образцы. Для изготовления диодов использовались монокристаллические пластины CdTe *p*-типа проводимости японской компании ACRORAD с удельным сопротивлением $\rho = 2\text{--}4 \cdot 10^9 \Omega \cdot \text{cm}$ при комнатных температурах. Омические контакты были получены вакуумным напылением Ni. Результаты измерений при температурах 260–330 K свидетельствуют о линейности Ni/CdTe контактов при обеих полярностях включения и изменении напряжения от самого низкого до $\sim 100 \text{ V}$. Только при напряжениях выше 100 V и только при одной полярности подключения (минус на подложке, плюс на Ni) наблюдается значительное уменьшение сопротивления образца, что объясняется модуляцией подложки инжектируемыми туда дырками [4].

Контакты Шоттки площадью 4 mm^2 создавались вакуумным (10^{-6} Torr) напылением Al толщиной $0.1 \mu\text{m}$ при температуре подложки 150–200°C с последующей выдержкой в вакууме при той же температуре в течение 30–60 min. Затем методом литографии со стороны Al контакта создавалась мезаструктура высотой $\sim 10 \mu\text{m}$ (рис. 1). Омический Ni контакт к подложке создавался описанным выше методом.

Темновые вольт-амперные характеристики диодов. Отсутствие выпрямляющих свойств исследуемых Al/CdTe диодов наглядно иллюстрируется вольт-амперной характеристикой, представленной на рис. 2 в двойных логарифмических координатах (прямая линия — линейная аппроксимация $I(V)$ зависимости). Можно было бы предположить, что барьер Шоттки на контакте *p*-CdTe с Al не образуется. Однако прямым свидетельством наличия барьера Шоттки является возникновение фото э.д.с. 0.28–0.3 V (плюс на подложке, минус на Al контакте) при облучении образца лампой накаливания $100\text{--}150 \text{ mW/cm}^2$ (при облучении Ni

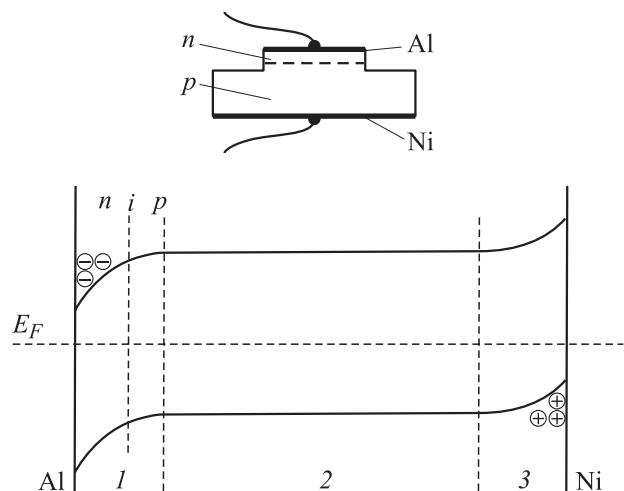


Рис. 1. Поперечное сечение и энергетическая диаграмма Al/CdTe/Ni диодной структуры. 1 — контакт Шоттки, 2 — нейтральная область, 3 — контакт, обогащенный Ni.

контакта фото э.д.с. не возникает). Энергетическая диаграмма кристалла с омическим контактом и контактом Шоттки представлена на рис. 1.

На контакте p -CdTe с Al зоны искривляются не вверх, как в случае обогащенного слоя на контакте с Ni, а вниз, и у поверхности кристалла образуется слой, обедненный дырками. Поскольку проводимость кристалла близка к собственной, даже небольшое искривление зон приводит к возникновению *инверсионного* p - n -перехода (на рис. 1 показан i -слой, разделяющий p - и n -области). Если после напыления Al произвести упомянутый выше низкотемпературный отжиг, приповерхностный слой с электронной проводимостью сохраняется даже при удалении слоя металла. Его проводимость оказывается настолько высокой, что при нанесении на поверхность *точечного* контакта вся площадь мезаструктуры становится рабочей. Это представляется важным для работы детектора в низкоэнергетической области рентгеновского излучения, где поглощение даже тонкого слоя Al может оказаться существенным.

Отсутствие выпрямления при напряжениях смещения ниже 3–5 V при наличии контакта Шоттки мы объясняем очень большим по-

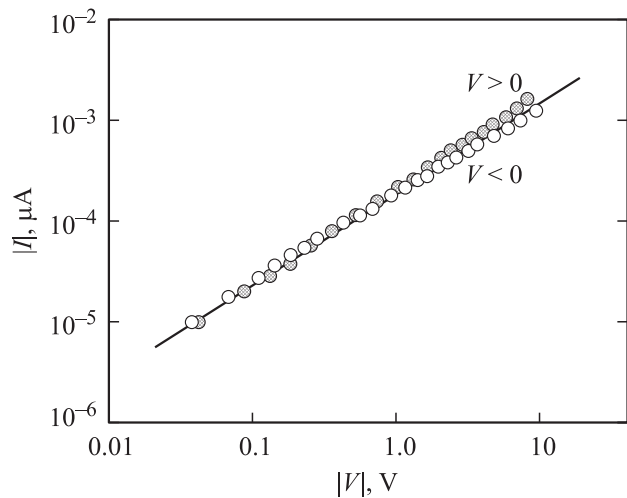


Рис. 2. Вольт-амперная характеристика диода в двойных логарифмических координатах.

следовательно включенным сопротивлением подложки R_s , которое при площади диода 1 mm^2 и толщине кристалла 0.5 mm превышает $10^{10} \Omega$ (300 К). Если на сопротивлении R_s падает большая часть приложенного напряжения, кристалл с контактом Шоттки ведет себя как линейное сопротивление, что и наблюдается на опыте. При повышении температуры сопротивление кристалла уменьшается, но одновременно увеличивается ток через диод. Поэтому вольт-амперная характеристика и при повышенных температурах остается линейной.

Вольт-амперные характеристики диодов при освещении. Другое дело — облучение кристалла подходящей длины волны. Если коэффициент поглощения α составляет, например, 5 cm^{-1} , эффективная глубина проникновения в материал α^{-1} равна 0.2 cm . Это означает, что на длине 2 mm интенсивность излучения ослабевает в $e = 2.71$ раз, а на длине, равной толщине кристалла 0.5 mm , фотовозбуждение материала можно считать примерно равномерным. Используя достаточно интенсивное облучение (со стороны подложки сквозь тонкий полупрозрачный слой Ni), можно сопротивление объемной части диодной структуры R_s существенно понизить.

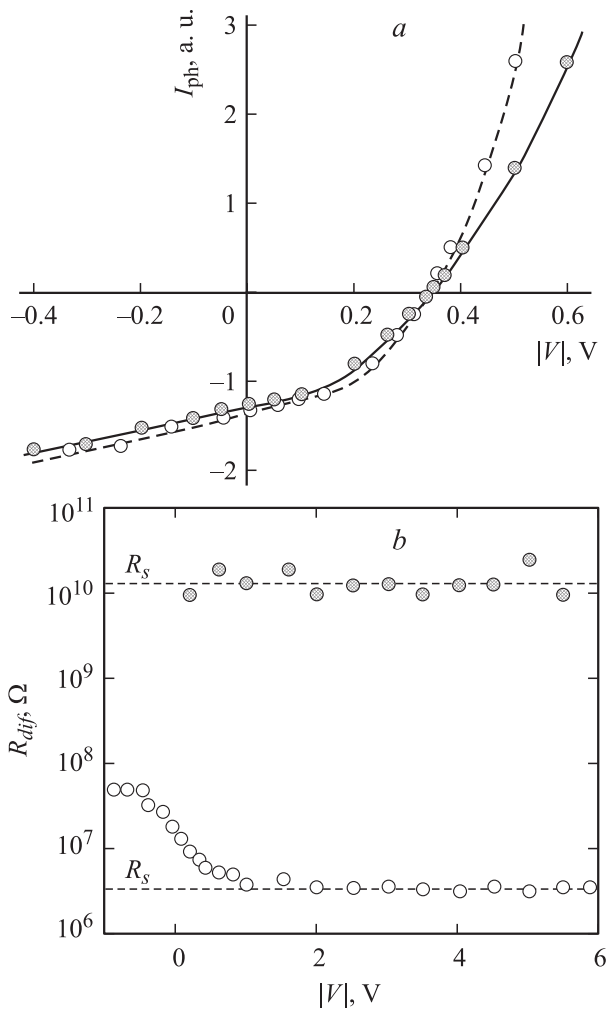


Рис. 3. *a* — начальный участок вольт-амперной характеристики освещенного CdTe диода ($\lambda = 860 \text{ nm}$, $\alpha = 5 \text{ cm}^{-1}$). Незаполненными кружками показана кривая с учетом падения напряжения на объемной части диода; *b* — зависимость дифференциального сопротивления CdTe диода от напряжения смещения в темноте и при освещении (заполненные и не заполненные кружки соответственно).

На рис. 3, *a* приведена вольт-амперная характеристика исследуемой диодной структуры, подвергнутой облучению длиной волны 860 nm ($\alpha = 5 \text{ cm}^{-1}$). Получена кривая, характерная для зависимости фототока от напряжения $I_{ph}(V)$ для полупроводникового фотодиода. На рис. 3, *b* приведена зависимость дифференциального сопротивления освещенной исследуемой диодной структуры R_{dif} от напряжения. В отличие от аналогичной темновой характеристики, когда дифференциальное сопротивление не зависит от напряжения и равно сопротивлению подложки, при освещении наблюдается зависимость R_{dif} от V , также характерная для полупроводникового диода. При повышенных прямых смещениях дифференциальное сопротивление R_{dif} не зависит от напряжения и равно сопротивлению подложки R_s (участок насыщения на рис. 3, *b*). Обратим внимание на то, что сопротивление освещенной подложки составляет $3 \cdot 10^6 \Omega$, т.е. более чем на три порядка меньше, чем сопротивление подложки в темноте $\sim 10^{10} \Omega$ (рис. 3, *b*). Такое резкое уменьшение последовательного сопротивления R_s и позволило выявить диодную характеристику контакта Шоттки.

Падение напряжения на сопротивлении освещенной подложки ($3 \cdot 10^6 \Omega$) легко найти, умножая его на величину тока через диод. Отнимая это падение напряжения от приложенного напряжения, мы получим зависимость фототока от напряжения на контакте Шоттки, а не от напряжения, приложенного ко всей диодной структуре. Результат такой корректировки характеристики показан на рис. 3, *a* незаполненными кружками. В результате кривая $I_{ph}(V)$ только несколько видоизменяется, хотя общий ее характер сохраняется.

Расчет вольт-амперной характеристики. Результаты проведенных ранее исследований [4] свидетельствуют о том, что электрические свойства диодов Шоттки на основе CdTe находят объяснение в рамках теории Саа–Нойса–Шокли, в соответствии с которой ток через диод находится интегрированием скорости генерации–рекомбинации по всей области пространственного заряда

$$I_{g-r} = Aq \int_0^w \frac{n(x, V)p(x, V) - n_i^2}{\tau_{po}[n(x, V) + n_1] + \tau_{no}[p(x, V) + p_1]} dx, \quad (1)$$

где A — площадь диода, q — заряд электрона, $n(x, V)$ и $p(x, V)$ — концентрация носителей в зонах, τ_{no} и τ_{po} — времена жизни электронов и дырок в области пространственного заряда. Величины n_1

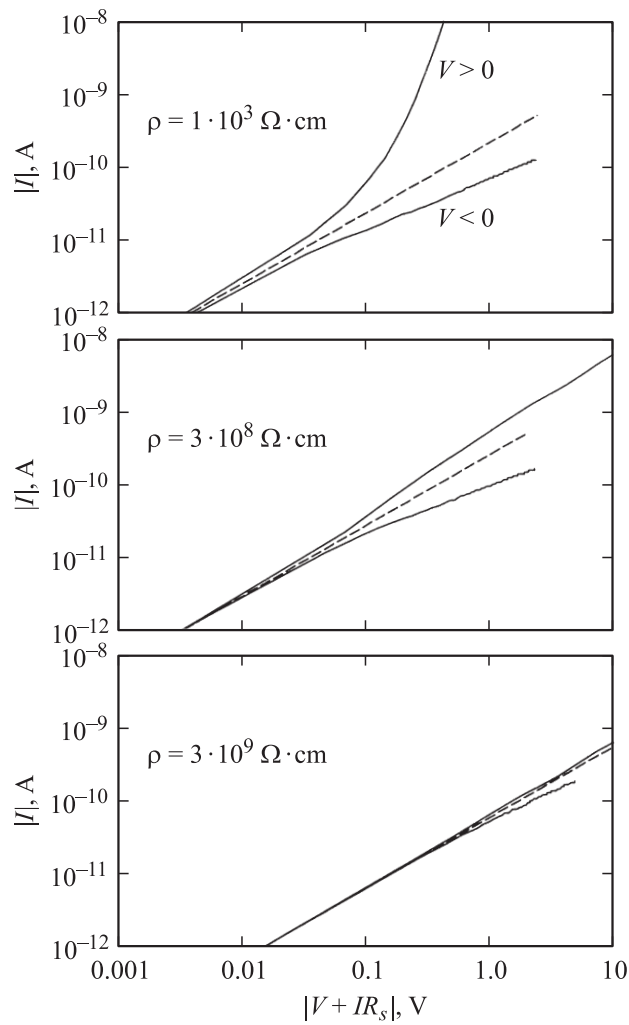


Рис. 4. $I-V$ характеристика диода, рассчитанная по формуле (1) с учетом падения напряжения на сопротивлении подложки с различным удельным сопротивлением (300 К). Штриховой линией на нижнем рисунке показана линейная аппроксимация $I-V$ зависимости.

и p_1 равны равновесным концентрациям электронов и дырок n_0 и p_0 при условии, что уровень Ферми совпадает с рассматриваемым уровнем, т.е.: $p_1 = N_v \exp(-E_t/kT)$ и $n_1 = N_c \exp[-(E_g - E_t)/kT]$, где $N_c = 2(m_n kT/2\pi\hbar^2)^{3/2}$ и $N_v = 2(m_p kT/2\pi\hbar^2)^{3/2}$ — эффективные плотности состояний соответственно в зоне проводимости и валентной зоне (m_n и m_p — эффективные массы электронов и дырок), E_t — энергетическое расстояние генерационно-рекомбинационного уровня от потолка валентной зоны.

Эволюция $I-V$ характеристики, рассчитанной по мере увеличения удельного сопротивления используемого материала при неизменных других параметрах диодной структуры [4], показана на рис. 4. Эффективные массы электронов и дырок m_n и m_p были приняты равными соответственно $m_n = 0.11m_0$ и $m_p = 0.35m_0$, их времена жизни $\tau_{n0} = \tau_{p0} = 10^{-7}$ с, энергия ионизации генерационно-рекомбинационного уровня $E_t = 0.73$ eV, что соответствует половине ширины запрещенной зоны CdTe (1.46 eV при 300 К).

Как видно из рис. 4, для случая $\rho = 10^3 \Omega \cdot \text{cm}$ наблюдается стремительное (экспоненциальное) возрастание прямого тока и медленное (сублинейное) — обратного, так что при напряжении 0.4 В прямой ток превышает обратный примерно на 3 порядка. Для $\rho = 3 \cdot 10^8 \Omega \cdot \text{cm}$ выпрямляющие свойства диода заметно ухудшаются, а при $\rho = 3 \cdot 10^9 \Omega \cdot \text{cm}$ — практически исчезают. Обратим внимание, что $I-V$ зависимость становится практически линейной как при прямом, так и обратном включении, только когда удельная проводимость материала вплотную приближается к собственной. Представленные результаты расчетов служат еще одним подтверждением представленного выше объяснения наблюдаемых характеристик диодов на основе CdTe с почти собственной проводимостью.

Заключение. Исследованы вольт-амперные характеристики диодов Шоттки на основе монокристаллов CdTe слабо выраженного p -типа с почти собственной проводимостью ($\rho = 2-4 \cdot 10^9 \Omega \cdot \text{cm}$). Отсутствие выпрямляющих свойств диодов при напряжениях смещения ниже 3–5 В объясняется очень большим сопротивлением подложки. Фотовозбуждение излучением с малым коэффициентом поглощения позволяет существенно понизить сопротивление объемной части диодной структуры и выявить выпрямляющую характеристику диода Шоттки. Расчет вольт-амперной характеристики в рамках модели генерации–рекомбинации Саа–Нойса–Шокли подтверждает сделанные предположения.

Список литературы

- [1] *Takahashi T., Watanabe S.* // IEEE Trans. Nucl. Sci. 2001. V. 48. P. 950.
- [2] *Watanabe S., Takahashi T., Okada Y., Sato G., Kouda M., Mitani T., Kobayashi Y., Nakazawa K., Kuroda Y., Onishi M.* // IEEE Trans. Nucl. Sci. 2002. V. 49.
- [3] *Tanaka T., Kobayashi Y., Mitani T., Nakazawa K., Oonuki K., Sato G., Takahashi T., Watanabe S.* // New Astronomy Reviews. 2004. V. 48. P. 309.
- [4] *Косяченко Л.А., Масляничук Е.Л., Склярчук В.М.* // ФТП. 2005. Т. 39. С. 754.