

УДК 535.215.1 и 535.215.6

С. В. Яблонский<sup>1</sup>, С. Г. Юдин<sup>1</sup>, В. В. Боднарчук<sup>1</sup>, Е. В. Левин<sup>2</sup>,  
Э. А. Сото-Бустаманте<sup>3</sup>, К. Йошино<sup>4</sup>

## ФОТОПРИЕМНИКИ С ВНУТРЕННИМ УСИЛЕНИЕМ НА ОСНОВЕ МЕДНОГО КОМПЛЕКСА ФТАЛОЦИАНИНА

## PHOTODETECTORS WITH INTERNAL AMPLIFICATION BASED ON COPPER COMPLEX OF PHTHALOCYANINE

<sup>1</sup>Институт кристаллографии им. А. В. Шубникова РАН,

119333 Москва, Ленинский пр., д. 59. E-mail : yablonskii2005@yandex.ru

<sup>2</sup>Физический институт им. П. Н. Лебедева РАН, Москва, Ленинский пр., д. 53

<sup>3</sup>Чилийский университет, факультет химии и фармацевтики,

Касилла 233, Сантьяго 1, Чили

<sup>4</sup>Университет г. Осака, инженерный факультет, Ямада-Ока, Осака, Япония

В работе исследовались электрофизические свойства фотодиодов на основе барьера Шоттки, образующегося на границе раздела алюминиевый электрод – фталоцианин меди. В качестве буферных слоев между полупроводником (фталоцианином меди) и алюминиевым электродом помещались тонкие диэлектрические слои, имеющие ненулевую спонтанную поляризацию. В качестве диэлектрических слоев использовались спонтанно поляризованные жидкокристаллические полимеры с примесью жидкокристаллических мономеров, полимерные сегнетоэлектрики (сополимер поливинилиденфторида с трифторэтиленом) и пироэлектрические органические поликристаллические пленки (гуанидин). Работа фотодиода изучалась как в фотовольтаическом, так и в фотодиодном режимах. Исследования проводились в контакте с атмосферой воздуха, при комнатной температуре. Было показано, что в отличие от фотодиодов на основе кремния и германия фотодиод на основе фталоцианина меди имеет сильную зависимость обратного фототока от обратного постоянного смещения, что дает возможность управлять квантовым выходом устройства в широком динамическом диапазоне, так называемый эффект внутреннего усиления. Была измерена ампер-ваттная характеристика фотодиода как в полосе собственного поглощения, так и в длинноволновой области вне полосы поглощения фталоцианина. Сдвиг полосы поглощения в длинноволновую область объясняется как изменением энергетического спектра молекул фталоцианина адсорбированных на металлическом электроде, возможностью фотоэмиссии из металлического электрода в зону проводимости красителя, так и наличием примесных уровней.

**Ключевые слова:** фталоцианины, органические полупроводники, жидкие кристаллы, диэлектрики, сегнетоэлектрики.

*The photodiode on the basis of aluminum/copper phthalocyanine (Al/PcCu) Schottky junction is considered. The photodiode is operated in photoconductive mode at room temperature and do not require encapsulation. The basic characteristic of PcCu photodiode have been determined. It was shown the PcCu photodiode shows strong reverse current – bias voltage dependence. The current responsivity of photodiode has been also measured out of the absorption band of PcCu to be 100 $\mu$ A/W ( $\lambda=1060$  nm). The possibility of the control of quantum efficiency of PcCu photodiode by electric field will be concerned. The construction of PcCu photodiode contains thin pyroelectric buffer layers (polymer ferroelectric film, polymer liquid crystalline film, organic polycrystalline film) to prevent de-*

struction of *al* electrode. It was found that the presence of buffer films essentially enhances lifetime of *PcCu* photodiodes.

**Key words:** *phthalocyanines, organic semiconductors, liquid crystals, dielectrics, ferroelectrics.*

## Введение

Неорганические фотодиоды с барьером Шоттки обладают рядом существенных преимуществ в сравнении с фотодиодами на основе *p-n* переходов [1—3]. Прежде всего, технологически процесс изготовления диодов Шоттки значительно проще. Кроме того, появляется возможность использования материалов, на которых не удастся создать *p-n* переход. Процесс изготовления диодов Шоттки хорошо совместим с технологическим процессом изготовления интегральных схем. Фотодиоды Шоттки обладают высокой чувствительностью и быстродействием. Они относительно не чувствительны к наличию поверхностных инородных включений и проявляют высокую устойчивость к воздействию интенсивного излучения в видимом и ультрафиолетовом диапазонах. Фотодиод, в отличие от фоторезистора, не обладает внутренним усилением фототока, он является слаботочным прибором и обладает высоким сопротивлением. Поэтому обычно он применяется совместно с усилительными элементами. В фотодиодном режиме барьер фотодиода смещается в обратном направлении под действием приложенного напряжения. Величина смещения зависит от типа фотодиода и варьируется в пределах от единиц до сотен вольт. От величины смещения зависит быстродействие прибора, а также величина протекающих через него токов. Недостатком фотодиодного режима является тот факт, что при увеличении обратных токов увеличивается уровень шумов, в то время как уровень полезного сигнала остается постоянным и не возрастает. В этом режиме фотодиод имеет меньшую собственную постоянную времени [4]. В фотогальваническом режиме диод выступает в роли источника ЭДС с большим внутренним сопротивлением. Это является неоспоримым плюсом для разрабатываемого устройства, так как учитывая тот факт, что устройство должно быть автономным, и, соответственно, питание осуществляется от собственных гальванических элементов, отсутствие напряжения на фотоприемнике, во-первых, существенно продлевает срок эксплуатации от одного источника и, во-вторых — увеличивает круг выбора датчиков, подходящих для применения в разработке, так как рабочее напряжение большинства фотодиодов составляет десятки вольт. Фотогальванический режим позволяет применять их, не прикладывая к ним никакого напряжения. Существенным недостатком неорганических фотодиодов являются их относительная дороговизна, а технологический процесс их изготовления требует повышенных температур, что не всегда совместимо с условиями эксперимента. Их альтернативой являются фотодиоды на основе органических полупроводников. Органическая электроника в настоящее время является бурно развивающейся областью современной технологии. Огромное преимущество органической (пластиковой) электроники заключается в том, что устройства на ее основе могут быть изготовлены прямым образом, используя автоматическое проектирование при очень высокой скорости производства. При этом процессе создаются гибкие поверхности большого размера, производимые при помощи струйной печати и не требующие применения сложной фотолитографии и вакуумных систем, которые необходимы для создания транзисторов на основе кристаллического кремния. Струйные технологии легко и дешево перестраиваются (не нужно делать чрезвычайно дорогостоящий набор масок, как для кремния), что чрезвычайно выгодно для малосерийных (тиражом менее десятков тысяч) схем. В принципе, каждая схема может быть уникальной, что немислимо для

традиционной фотолитографии, используемой в «кремниевом» технологическом процессе. Низкие температуры технологических процессов позволяют использовать дешевые подложки и наносить схемы на самый широкий спектр материалов. Недостатки органических полупроводников (как то — малое быстродействие схем на их основе) для многих применений просто несущественны, в то время как стоимость — решающий параметр. В качестве примеров подобных применений можно назвать фотоприемники, интеллектуальные датчики, «умная упаковка», электронная бумага и дисплеи и т. д.

В данной работе исследовались электрофизические характеристики фотодиода на основе барьера Шоттки на границе алюминий/фталоцианин меди [5]. Металло-комплексы фталоцианина синтезируются из невозобновляемых источников энергии, что следует из их названия «нафта» и «цианин», т. е. «нефть» и «темно-синий» [6]. Фталоцианины меди обладают высокой термической и химической устойчивостью — на воздухе практически не разрушаются вплоть до температур 400 °С. Они не взаимодействуют с сильными кислотами и сильными основаниями и обладают сильным оптическим поглощением в видимой области спектра и ближней ИК. Металло-комплексы фталоцианина являются органическими полупроводниками, как правило, *p*-типа. Дырочная проводимость получается в процессе окисления металло-комплексов фталоцианина с образованием достаточно большой концентрации положительных дефектов (порядка  $10^{15} \text{ см}^{-3}$ ) [7]. К сожалению, фталоцианины имеют невысокий квантовый выход, что является одним из главных препятствий для их практического использования (хотя, тем не менее, известны устройства на их основе [8]). Недостатками являются также низкая стабильность полупроводниковых структур на воздухе и их низкая подвижность.

Существенным результатом данной работы было обнаружение эффекта внутреннего усиления квантового выхода в фотодиодной структуре на основе  $\text{PcCu}$  при увеличении обратного смещения. Данный эффект напоминает эффект внутреннего усиления в лавинных диодах, также усиливающих фототок при работе в предпробойном режиме [9]. В эксперименте также исследовалась более сложная конструкция барьера Шоттки с использованием тонких диэлектрических буферных слоев. Слои были достаточно тонки, чтобы не нарушать свойства барьера. В качестве буферных слоев использовались органические материалы, обладающие спонтанной поляризацией. В перспективе такая структура может использоваться в гибридном режиме, несущем черты, как фотогальванического, так и диодного режимов. Так, известно, например, что в короткозамкнутой цепи деполяризующее поле диэлектрика, обладающего спонтанной поляризацией, может быть перераспределено между самим диэлектриком и буферным слоем [10]. Кроме того, буферные слои выполняют защитные функции, препятствующие электроокислению алюминиевого электрода в процессе работы обратно смещенного фотодиода Шоттки, находящегося контакте с атмосферой воздуха.

### Конструкция и изготовление фотодиода Шоттки

Фотодиодная ячейка показана на рис. 1. В конструкции использовались коммерческие стекла (1) с нанесенными полупрозрачными электродами ИТО (2) ( $\text{SnO}_2:\text{In}_2\text{O}_3 = 1:9$ ) толщиной 95 нм. Толщина измерялась с помощью атомно-силового микроскопа. Поверхностное сопротивление пленки ИТО равнялось 40  $\Omega/\text{квадрат}$ . В качестве органического полупроводника использовался  $\text{PcCu}$  без специальной очистки (НИОПиК, Москва). Химическая структура фталоцианина меди показана на рис. 2.  $\text{PcCu}$  в виде поликристаллического порошка распылялся в вакууме со скоростью 1–2 нм/мин

при остаточном давлении  $5 \times 10^{-5}$  мм. рт. ст. Образцы представляли собой  $\alpha$ -модификацию РсСu [11]. Толщина пленки (3), равная 400 нм, оценивалась по измерению оптической плотности и с помощью атомно-силового микроскопа. Буферный слой (4), состоящий из материала, имеющего ненулевую спонтанную поляризацию, создавали либо методом Шеффера (ЛБ-слои), либо вакуумным напылением. Буферные слои на основе ПВДФ-ТрФЕ (70:30) (15 ЛБ-слоев) и смеси жидкокристаллического полимера РМ6R8 с жидкокристаллическим мономером М6R8 [12–16] (15 ЛБ-слоев) получали методом Шеффера с поверхности воды в ленгмюровской ванне. Технология приготовления тонких плёнок из сегнетоэлектрических сополимеров подробно описана в работе [17]. Буферный слой из гуанидина толщиной порядка 100 нм наносился вакуумным напылением. Химические формулы веществ, использованных в качестве буферных слоев, показаны на рис. 3.

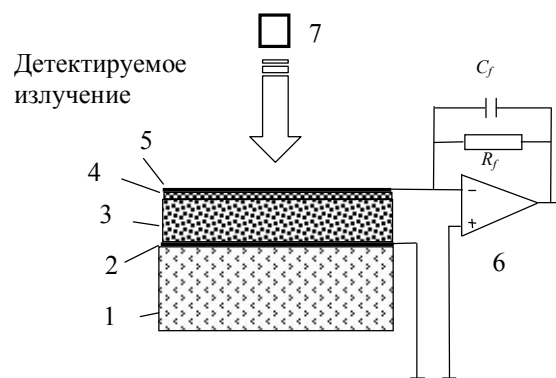


Рис. 1. Конструкция фотодиода Шоттки и измерительная схема детектирования оптического излучения:

1 – стеклянная подложка (толщина  $d = 1$  мм); 2 – ИТО электрод ( $d = 95$  нм); 3 – полупроводниковый слой РсСu ( $d = 400$  нм); 4 – буферный слой, состоящий из пьезоэлектрических материалов: сегнетоэлектрический сополимер ПВДФ-ТрФЕ (70:30), жидкокристаллический полимер в смеси с мономером РМ6R8-М6R8 (66:33), гуанидин; 5 – алюминиевый электрод ( $d = 20$  нм); 6 – преобразователь ток-напряжение; 7 – применяемые в эксперименте источники излучения: импульсный лазер ЛТИ-ПЧ,  $\lambda = 1,06$  мкм; импульсный полупроводниковый лазерный диод – Picoquant PDL 800-B,  $\lambda = 0,784$  мкм; арсенид галлиевые светодиоды  $\lambda = 0,68$  мкм; 0,920 мкм; 0,940 мкм; ксеноновая лампа; инфракрасный глобар; вольфрамовая лампа накаливания. Справа показан усилитель, представляющий собой преобразователь ток-напряжение

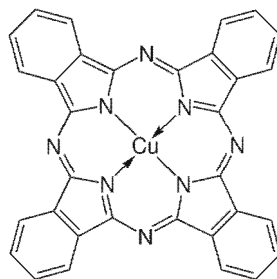


Рис. 2. Химическая структура РсСu

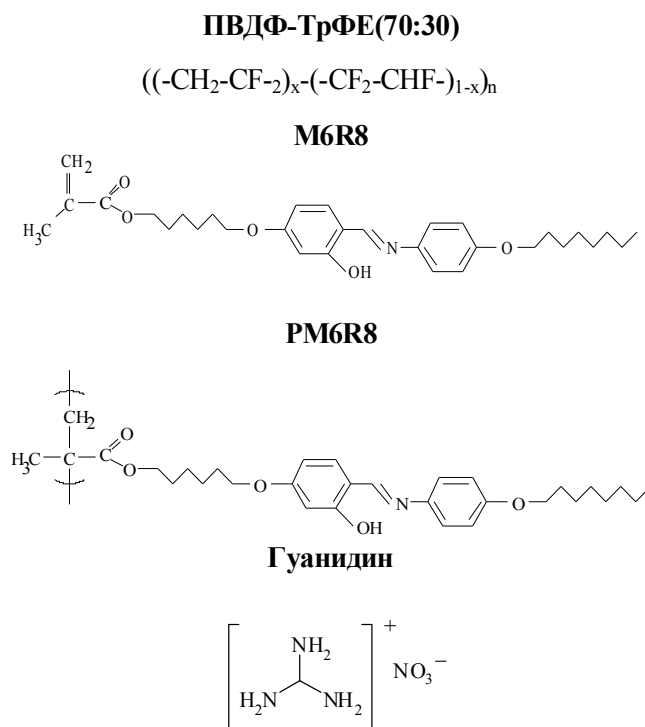


Рис. 3. Химические формулы веществ, использованных для приготовления буферных слоев

Следует отметить, что пироэлектрические слои сегнетоэлектрического полимера и жидкокристаллической смеси в настоящем эксперименте были неориентированны и специальные меры для их монодоменизации не принимались. Что касается гуанидина, то этот материал ориентировался спонтанно, в процессе напыления. Алюминиевый электрод (5) толщиной порядка 20 нм также наносился вакуумным распылением на стандартном напылительном устройстве ВУП-4. Медные провода, обеспечивающие контакт с электродами, фиксировались с помощью индиевого припоя.

### Измерение электрофизических характеристик фотодиода Шоттки и обсуждение полученных результатов

Изображенная на рис. 1 полупроводниковая структура представляет собой диод Шоттки с барьером на границе Al/PcSi. На границе ITO/PcSi формируется омический контакт, что следует из энергетической диаграммы, показанной на рис. 4. В условиях равновесия при непосредственном контакте, исходя из известных работ выхода, Al электрод заряжается положительно, а PcSi – отрицательно, формируя встроенное электрическое поле, направленное от алюминиевого электрода вглубь полупроводника [5]. Таким образом, формируется диодная структура, в которой минус на алюминиевом электроде соответствует прямому направлению тока диода, а плюс – обратному. В данном рассмотрении мы игнорируем наличие буферных слоев из-за их слабого влияния на транспортные свойства диода, что было показано экспериментально.

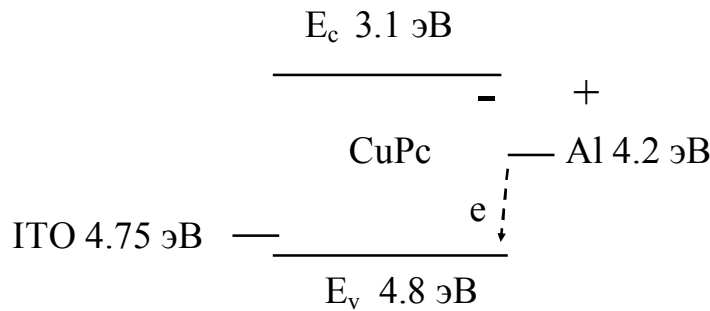


Рис. 4. Энергетическая диаграмма полупроводниковой структуры на основе ITO/PcCu/Al. Здесь  $E_v$  обозначает энергию высшей занятой орбитали (НОМО), а  $E_c$  – энергию низшей незанятой орбитали (LUMO). Работа выхода из ITO равна 4,75 эВ, PcCu-4,8эВ, Al-4,2эВ

Для демонстрации диодных свойств полупроводниковой структуры измерялась темновая ампер-вольтовая характеристика. Результаты показаны на рис. 5. Здесь представлены результаты измерения полупроводниковой структуры с буферным слоем, состоящим из 15 ЛБ-слоев сегнетоэлектрического сополимера ПВДФ-ТрФЕ (70:30). Следует отметить, что незначительно отличающиеся результаты были получены и на образцах как без буферного слоя, так и с буферным слоем на основе жидкокристаллической полимер-мономерной смеси РМ6R8-М6R8 (66:33). Ниже будут приведены результаты лишь для полупроводниковых структур с участием буферного слоя из сегнетоэлектрического полимера. Защитная пленка из гуанидина также в дальнейшем не рассматривается, поскольку нанесение гуанидина существенно изменяло (увеличивало) проводимость фталоцианиновой пленки, что приводило к недопустимому увеличению темного обратного тока, что в свою очередь приводило к недопустимому росту дробового шума.

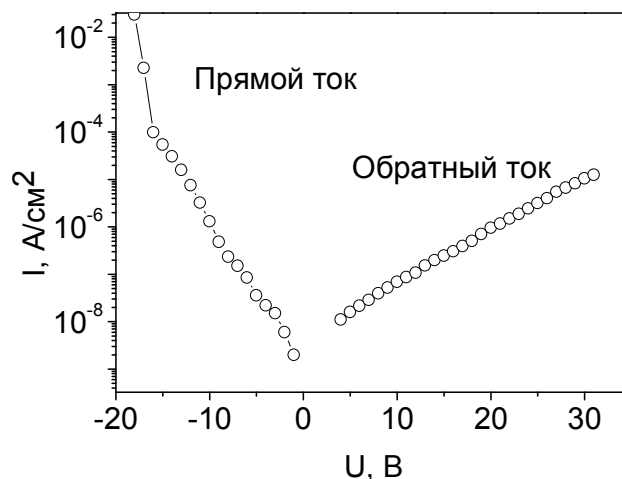


Рис. 5. Темновая  $I-U$  характеристика диода Шоттки на основе медного комплекса фталоцианина PcCu (400 нм) с буферным слоем из ПВДФ-ТрФЕ (15 ЛБ-слоев)

Из рис. 5 следует, что при  $U = 17$  В ректификационное отношение (отношение прямого тока к обратному току) превышает  $10^5$ . Дополнительные измерения показали, что для более тонких слоев PcCu такое отношение достигается при существенно мень-

ших напряжениях, что приближает характеристики органического диода к неорганическому. На рис. 6 кривая 3 показан монотонный рост фототока при возрастании обратного напряжения. Этот факт является наиболее важным в представленной работе. В подобной ситуации фототок в неорганических фотодиодах не зависит от приложенного напряжения. Похожее поведение имеет место для фоторезисторов, работающих на эффекте фотопроводимости, в условиях отсутствия барьеров на границе с металлическими проводниками [18]. Фототок растет с ростом напряжения также и в лавинных диодах, когда внутреннее усиление происходит из-за размножения носителей тока внутри полупроводника в сильных электрических полях. Оба этих случая не объясняют наблюдаемую ситуацию. Рост тока в органическом полупроводнике, хорошо коррелирует с ростом концентрации носителей при увеличении напряженности электрического поля как это имеет место в модели Онзагера [19]). В модели Онзагера вероятность диссоциации электрон-дырочной пары в экситоне увеличивается с ростом электрического поля в полупроводнике. Следует, на наш взгляд, также учитывать влияние электрического поля на вероятность рекомбинации носителей тока (уменьшение вероятности рекомбинации) из-за уменьшения времени пролета носителей тока с ростом напряженности электрического поля, что также может способствовать увеличению концентрации носителей.

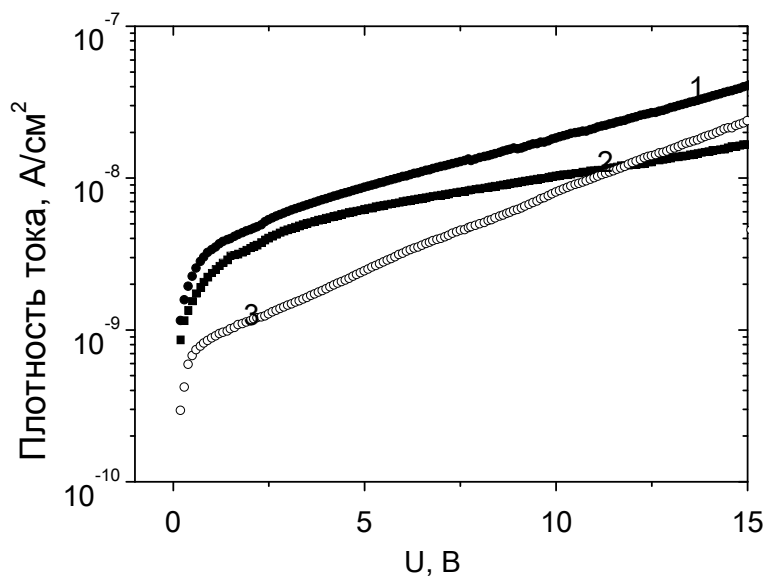


Рис. 6.  $I$ - $U$  характеристики для РсСu (400 нм), буферный слой ПВДФ-ТрФЕ (15 ЛБ-слоёв):

1 – обратный ток при освещении; 2 – темновой ток; 3 – фототок (разность между значениями кривой 1 и 2). Источник излучения – GaAg импульсный лазерный диод – Picoquant PDL 800-B,  $\lambda = 0,784$  мкм, длительность импульса  $\tau = 250$  псек, частота повторения  $\nu = 80$  МГц, средняя мощность 10 мВт.

Измеритель вольт-амперной характеристики – автоматический мост Keithley SMU 236

Ампер-ваттная чувствительность фотодиода  $s$  в зависимости от длины волны света и смещения, а также спектральная оптическая плотность РсСu показаны на рис. 7.

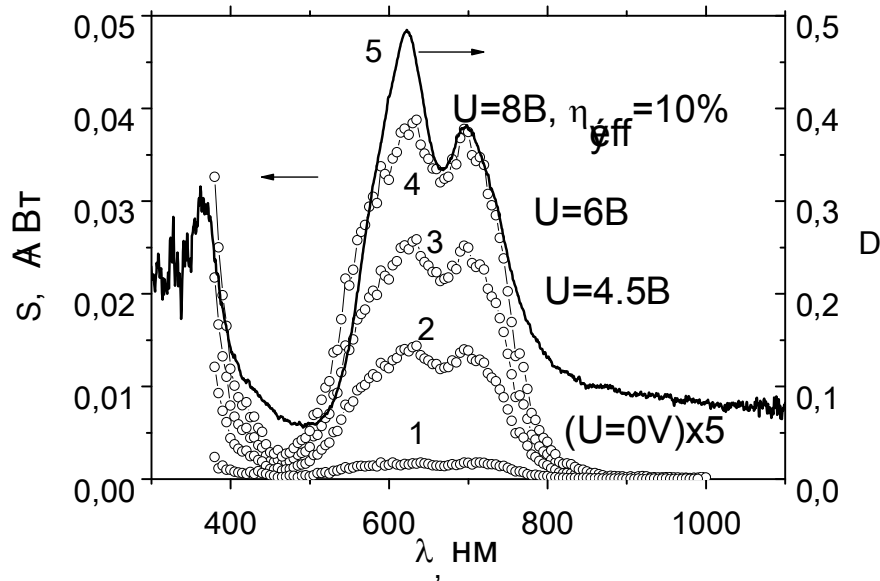


Рис. 7. Ампер-ваттная чувствительность  $S$  медного комплекса фталоцианина  $PcCu$  (400 нм) с буферным слоем ПВДФ-ТрФЕ (70:30) (15 ЛБ-слоев):  
 1 – фотовольтаический режим  $U = 0$  В; 2 –  $U = 2$  В; 3 –  $U = 4$  В; 4 –  $U = 6$  В;  
 5 – Оптическая плотность  $D$  в зависимости от длины волны света.  
 Источник излучения – ртутная лампа

В качестве источника излучения в данном случае использовалась ксеноновая лампа ДКСШ-150 с монохроматором ЗМР-3. Фототок регистрировался на частоте прерывания обтюлятора  $\nu = 80$  Гц. На рис. 7 хорошо видно, что в общих чертах спектр фототока совпадает со спектром фталоцианина. Отклик фотонного детектора обычно описывается квантовой эффективностью  $\eta(E)$  или токовой чувствительностью  $s(E)$ . Квантовая эффективность полупроводникового фотодиода определяется как число электрон-дырочных пар создаваемых одним фотоном энергии  $E$ , в то время как токовая чувствительность есть фототок в амперах на падающую мощность излучения в ваттах. Квантовая эффективность и токовая чувствительность связаны между собой следующим соотношением :

$$s(E) = \eta(E) e / E,$$

где  $e$  – заряд электрона. Для смещения  $U = 6$  В (рис. 7, кривая 4) максимальный квантовый выход составил 8 % на длине волны 0,631 мкм, соответствующей максимуму оптической плотности. Таким образом, квантовый выход монотонно возрастает от 0,08 % при  $U = 0$  (фотогальванический режим) до 8 % при  $U = 6$  В (фотодиодный режим). Следует сказать, что на практике нам удавалось для оптимально подобранных параметров фотодиодной ячейки достигать значений квантового выхода около 30 %, что всего лишь в 2 раза уступает квантовой эффективности фотодиода на основе кремния.

На рисунке 8, кривые 2 и 3, показан фотоэлектрический ток в зависимости от длины волны света с использованием в качестве источника излучения глобара. Спектральная чувствительность фотодиода распространяется в ближнюю инфракрасную область, лежащую вне области поглощения  $PcCu$ , вплоть до 1.3 мкм. Для сравнения приведена (рис. 7, кривая 1) спектральная характеристика органического пироэлектрика



тетрааминодифенила (ТАДФ) [20], откуда следует, что область спектральной чувствительности пироэлектрического отклика кардинально отличается от фото-отклика, изображенного на рис. 7, кривые 2 и 3. Таким образом, можно утверждать, что природа эффекта в области ближнего ИК связана с рождением электронно-дырочных пар, как это имеет место в фотонных приемниках излучения, а не с тепловым воздействием, приводящим к изменению спонтанной или индуцированной поляризации. Причина расширения спектральной чувствительности фотодиода в ИК-область может быть связана как с примесным поглощением, так и с изменением энергии адсорбированных на Al электроде слоёв PсCu.

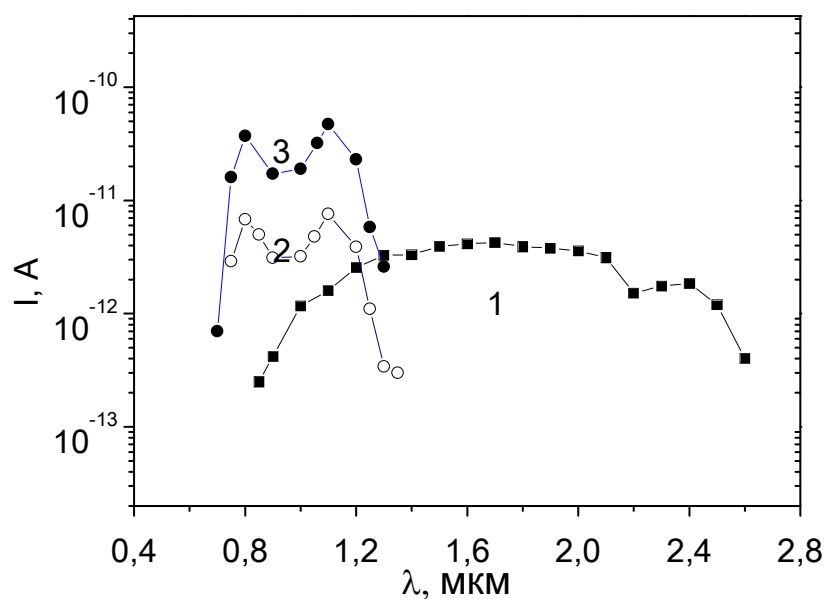


Рис. 8. 1 – Пироэлектрический ток для образца пленки из органической поликристаллической плёнки ТАДФ. Толщина пленки 4 мкм. Пироэлектрический коэффициент  $\gamma = 5$  нКул/см<sup>2</sup>. Фототок в зависимости от длины волны света для образца из PсCu (400 нм) с буферным слоем ПВДФ-ТрФЕ (15 ЛБ-слоев). 2 – напряжение смещения  $U = 0$ В; 3 –  $U = 5$ В. Источник излучения – глобар при  $T = 1180$  °С

В процессе исследования обратно смещенных диодов Шоттки было обнаружено, что Al-электрод по истечении времени исчезает (рис. 9). Скорость деградации электрода существенно уменьшалась, если использовались защитные буферные слои. Интересно, что напыление защитного слоя непосредственно на поверхность Al-электрода, практически не влияло на эту скорость. В дальнейшем планируется провести более подробное исследование данного эффекта для выяснения его механизма.

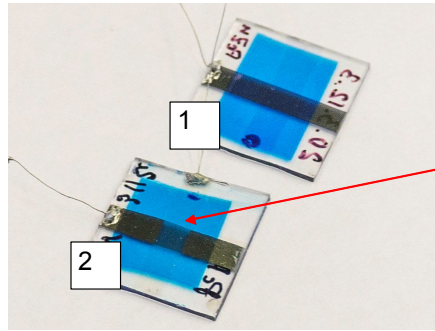


Рис. 9. Образцы фотодиодов:

- 1 – до приложения напряжения смещения, 2 – после 30-минутной выдержки при напряжении 31 В. РсСu (400 нм), буферный слой (15 ЛБ-слоев).  
Стрелка указывает на деградированный участок алюминиевого электрода

### Выводы

В работе исследовались полупроводниковые диодные структуры на основе РсСu с буферными слоями из материалов, обладающих спонтанной поляризацией. Обнаружен эффект внутреннего усиления фототока в обратно смещенном фотодиоде Шоттки. Эффект может быть объяснен в рамках теории Онзагера увеличением концентрации носителей в сильных электрических полях. В перспективе органические диоды с буферными слоями из материалов со спонтанной поляризацией могут использоваться в солнечных батареях. Ожидается, что использование встроенного поля пьезоэлектрика увеличит квантовую эффективность солнечной батареи. Обнаружен паразитный эффект электромиграции алюминиевого электрода (катода). Эффект может быть значительно подавлен с помощью использования защитных буферных слоев.

*Авторы выражают благодарность проф. Лукьянцу Е. А. за предоставленные образцы металло-комплексов фталоцианина. Работа финансировалась в рамках гранта РФФИ № 12-02-00214-а.*

### Список использованной литературы

1. Tongay S., Lemaitre M., Schumann Berke T., Appleton B. R. // Appl. Phys. Lett. 2011. Vol. 99. P. 102102—102104.
2. Seto M., Leduc J.-V. // Solid-State Device Research Conference. 1997. Proceedings of the 27th European, 22—24 September. 1997. P. 604—607.
3. Biyikli N., Kimukin I., Butun B. // IEEE Journal of selected topics in quantum electronics. 2004. Vol. 10, № 4. P. 759—765.
4. Гуртов В. А. Твердотельная электроника. Петрозаводский гос. ун-т, Петрозаводск, 2004. 407 с.
5. Mahapatro A. K., Ghosh S. // Appl. Phys. Lett. 2002. Vol. 80. P. 4840—4842.
6. Симон Ж., Андре Ж.-Ж. Молекулярные полупроводники. М. : Мир, 1988. 343 с.
7. Саркисян Т. А. // Известия НАН Армении. 2011. Т. 46, № 3. С. 185—193.
8. Zhen L., Shang L., Tu D., Ji Z., Liu X., Liu G., Liu J., Wang H. // Appl. Phys. Lett. 2008. Vol. 93. P. 203302-1-3.
9. Садыков З. Я., Бурбаев Т. М., Курбатов В. А. // Физика и техника полупроводников. 2001. Т. 35, вып. 1. С. 115—119.

10. Yuan Y., Reece T. J., Sharma P. et al. // Nature Materials. 2011. Vol. 10 (4). P. 296–302.
11. Harrison S. E., Ludeweg K. H. // J. Chem. Phys. 1966. Vol. 45. P. 343–348.
12. Soto-Bustamante E. A., Yablonskii S. V., Ostrovskii B. I. et al. // Chem. Phys. Lett. 1995. Vol. 240. P. 464–466.
13. Soto-Bustamante E. A., Yablonskii S. V., Ostrovskii B. I. et al. // Liquid Crystals. 1996. Vol. 21, № 6. P. 829–834.
14. Yablonskii S. V., Grossmann S., Weyrauch T. et al. // Ferroelectrics. 2000. Vol. 247. P. 343–350.
15. Soto-Bustamante E. A., Yablonskii S. V., Vergara-Tolosa R. O., Haase W. // Advanced Materials. Vol. 204, № 16. P. 1936–1940.
16. Яблонский С. В., Сото-Бустаманте Е. А. // ЖЭТФ. 2010. Т. 138. С. 921–929.
17. Bune A. V., Fridkin V. M., Ducharme S., Blinov L. M., Palto S. P. et al. // Nature. 1998. Vol. 391. P. 874–877.
18. Роуз А. Основы теории фотопроводимости. М. : Мир, 1966. 192 с.
19. Поуп М., Свенберг Ч. Электронные процессы в органических кристаллах. М. : Мир, 1985. Т. 1. 543 с.
20. Певцов Е. Ф., Сигов А. С., Малето М. И., Свотина А. П. // Сборник докладов 14-го Международного симпозиума «Тонкие пленки в оптике и электронике». Харьковская научная ассамблея (ISTFE-14) 22–27 мая 2002 г. Харьков, Украина. Харьков : ННЦ ХФТИ, ИПЦ «Контраст», 2002. Ч. 2. С. 166–170.

Поступила в редакцию 6.11.2013 г.