

ИНЖЕКЦИОННЫЕ ФОТОДИОДЫ НА ОСНОВЕ МОНОКРИСТАЛЛОВ $A^{II}B^{VI}$

Г.Лубегин, Д.Онищенко, В.Гуслянников, МИЭТ (ГУ)

Миниатюрные персональные приборы, предупреждающие о скоплении метана или, наоборот, о нехватке кислорода в рабочих и жилых зонах, – это просто спасение чьих-то жизней. В газоанализаторах повышенной чувствительности используют инжекционные фотодиоды (ИФД). Разработан метод варьирования количества халькогенидов металлов в твердых растворах монокристаллов $A^{II}B^{VI}$, который позволяет создать целый ряд ИФД, обладающих чувствительностью в различных областях оптического спектра.

Измерения концентрации веществ, загрязняющих воздух, актуальны для промышленных предприятий. Известные способы оценки загрязнения воздуха используют спектрально-оптические методы, основанные на изменении интенсивностей спектральных линий, излученных или поглощенных анализируемой средой. Разработка новых технологий ИФД позволяет создать газоанализаторы повышенной чувствительности. Они необходимы для оперативных локальных измерений концентраций взрывоопасных продуктов, а также дозы ультрафиолетовых и рентгеновских излучений, стрессовых излучений в видимой и ИК-областях [1]. В первом случае контроль заключается прежде всего в спектрофотометрировании линий и полос поглощений (абсорбционные методы) или линий и полос излучений (эмиссионные методы) в различных областях оптического спектра (ближней ультрафиолетовой, видимой, ближней инфракрасной) вредных химических веществ [2]. Во втором случае – это измерение мощности доз излучений канцерогенных и стрессовых источников в различных областях опти-

ческого спектра: рентгеновской, ультрафиолетовой, видимой, инфракрасной.

В ходе экспериментов были исследованы структуры ИФД с $n-p^+$ -переходом на основе монокристаллов твердых растворов $A^{II}B^{VI}$. Эти ИФД имеют высокие характеристики: по спектральной чувствительности они сравнимы с ФЭУ, а по селективности – с интерференционными фильтрами. ИФД отличаются от обычных обратносмещенных фотодиодов с $p-n$ переходом на основе традиционных материалов, например элементарных полупроводников IV группы (Si, Ge) или бинарных соединений групп $A^{III}B^V$ (GaAs) и $A^{IV}B^{VI}$ (PbS). Это отличие в том, что они предназначены для работы со слабыми световыми потоками при прямом смещении, когда реализуется инжекционное усиление фототока. Механизм внутреннего инжекционного усиления фототока при прямом смещении основан на перераспределении напряжения смещения между высокоомной и низкоомной областями структуры. Причина такого перераспределения – изменение проводимости высокоомной области при освещении

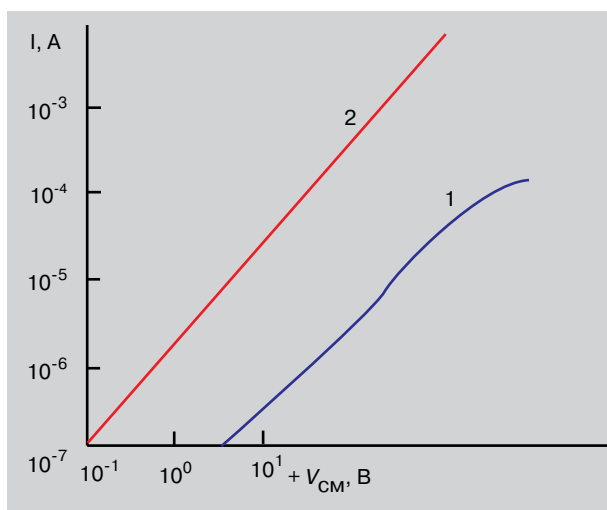


Рис. 1. Вольт-амперная характеристика фотодиода на основе $CdS_{0,85}Se_{0,15}$: 1 – в темноте; 2 – при освещении излучением $\lambda_{max} = 541$ нм, поверхностная плотность потока энергии $E_{\phi} = 10^{-10}$ Вт/мм²

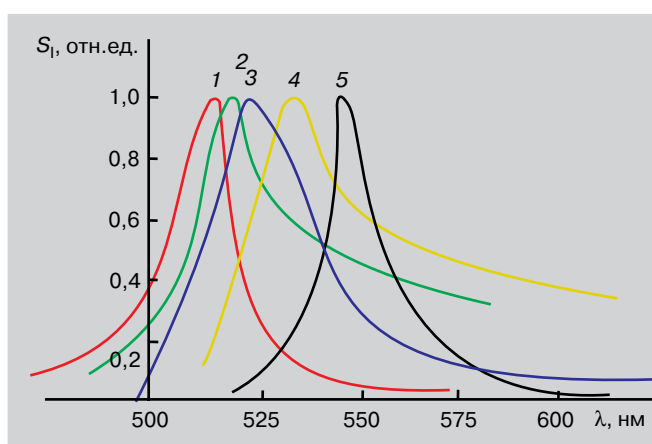


Рис. 2. Спектральные характеристики фотодиодов на основе CdS_ySe_{1-y} : кривая 1 – $y = 0,96$, $U_{cm} = 2$ В; кривая 2 – $y = 0,95$, $U_{cm} = 1$ В; кривая 3 – $y = 0,94$, $U_{cm} = 0,5$ В; кривая 4 – $y = 0,9$, $U_{cm} = 4$ В; кривая 5 – $y = 0,85$, $U_{cm} = 0,5$ В; кривые 1, 3, 5 – $E_{\phi} = 10^{-10}$ Вт/мм²; кривая 2 – $E_{\phi} = 1,3 \cdot 10^{-10}$ Вт/мм²; кривая 4 – $E_{\phi} = 1,8 \cdot 10^{-10}$ Вт/мм²

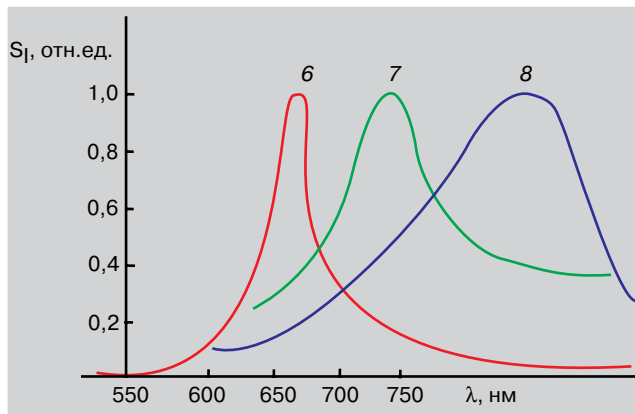


Рис.3. Спектральные характеристики фотодиодов на основе CdS_ySe_{1-y} ($S_{пов}=1 \text{ мм}^2$): линия 6 – $y = 0,55$, $U_{см} = 4 \text{ В}$, $E_{\phi} = 6 \cdot 10^{-10} \text{ Вт/мм}^2$; линия 7 – $y = 0,3$, $U_{см} = 4 \text{ В}$, $E_{\phi} = 10^{-9} \text{ Вт/мм}^2$; линия 8 – $y = 0,06$, $U_{см} = 6 \text{ В}$, $E_{\phi} = 10^{-10} \text{ Вт/мм}^2$

Технические характеристики прибора экологического контроля

Характеристика	Величина
Концентрация, порог, усл. ед.	0–1023
Спектральный диапазон ФПУ, нм	470–770
Погрешность измерения, %	≤7%
Инерционность, с	0,02–2,00
Рабочий диапазон температур, °С	От -20 до 40
Источник питания ФПУ с разным числом элементов, В	1,5 (1 эл); 3,0 (2 эл); 4,5 (3 эл)
Источник питания ИУ, В	4,5
Потребляемая мощность ФПУ, мВт	≤5
Потребляемая мощность ИУ, мВт	10 (с подсветкой 500)
Габариты ФПУ (без кабеля), мм	$d=16,6$; $l_1=170,0$; $l_2=120,0$; $l_3=70,0$
Габариты ИУ, мм	$115 \times 110 \times 55$
Масса ФПУ без ист. питания, г	200
Масса ИУ без ист. питания, г	170

шении ее светом с длиной волны λ , близкой к краю поглощения исходного монокристалла, и возникновения в связи с этим положительной обратной связи по току. Этот механизм хорошо описан [3].

Исследуемые инжекционные структуры n-p⁺-типа создавались методами осаждения металлов в вакууме и термодиффузии примесей в инертной атмосфере. Вольт-амперные характеристики (ВАХ) фотодиодных структур определяли на стенде; в его состав входили спектрофотометр СФ-46, вольтметр универсальный В7-21 и источник питания постоянного тока типа Б5-43. Типичная ВАХ исследуемых ИФД на основе монокристаллов твердых растворов CdS_ySe_{1-y} представлена на рис.1. Прямые темновые токи ВАХ имели диодный характер (кривая 1). Наблюдаемые обратные темновые токи всех структур при напряжениях смещения 1–10 В не превышали 10^{-8} А. Особое внимание привлекают спектральные характеристики исследованных фотодиодных структур на основе монокристаллов CdS_ySe_{1-y} . Характеристики всех восьми пронумерованных образцов структур ИФД представлены на рис.2 и 3. Образцы имели продольную конструкцию (вектор плотности тока коллинеарен вектору падающей электромагнитной волны). Удельное сопротивление исходных полупроводников составляло $\rho \sim 10^1\text{--}10^2 \text{ Ом} \cdot \text{см}$. Площадь фоточувствительной поверхности $S_{пов} \sim 1 \text{ мм}^2$. Образцы структур имели различные величины токовых чувствительностей в максимумах, а их фототоки изменялись в интервале $10^{-7}\text{--}10^{-2} \text{ А}$ при рабочих напряжениях смещения 0,5–6 В. Положения максимумов фоточувствительностей структур по спектру находились в интервале длин волн 519–726 нм. Полоса спектральной чувствительности на уровне 0,5 составляла 5–30 нм. Спектральная чувствительность в максимуме спектральной характеристики находилась в пределах от $5,4 \cdot 10^2$ до $1,69 \cdot 10^6$ отн. ед.

В разработанный многофункциональный прибор экологического контроля на основе ИФД входят фотоприемные устройства (ФПУ) [4] и цифровое измерительное устройство (ИУ), разработанные



Рис.4. Прибор экологического контроля

на кафедре общей физики МИЭТ. В ИУ данные о концентрации вещества, мощности доз излучений и о поглощенной накопленной дозе выводят на экран дисплея. В приборе использован микроконтроллер серии AVR фирмы ATMEL с JTAG-интерфейсом, совместимым со стандартом IEEE 1149.1. Прибор работает в автоматическом режиме; он программируемый, экономичен в работе (см. таблицу), имеет небольшие габариты (рис.4) и невысокую себестоимость. С помощью коррекции программного обеспечения микроконтроллера можно вводить в память прибора предельно допустимые концентрации химических веществ или нижний взрыво-

опасный предел летучих органических веществ и химических продуктов. Для контроля их превышения предусмотрена подача предупредительных и аварийных сигналов (звуковых, световых, вибрационных).

ЛИТЕРАТУРА

1. **Лубегин Г.В.** Дозиметрический контроль ультрафиолетового облучения биологических объектов. – Землеустройство, кадастр и мониторинг земель, 2008, №1.
2. **Лубегин Г.В.** Дозиметрический контроль ультрафиолетового облучения биологических объектов. – Новые экологические технологии, методики, оборудование, измерительные приборы и системы для исследования окружающей среды и природных ресурсов./Под ред. Т.Б. Агеева. – М.: ЦНТИ Мелиоводинформ, 2001, вып.2.
3. **Викулин И.М., Курмашев Ш.Д., Стафеев В.И.** Фотоприемники с инжекционным усилением. – Обзоры по электронной технике. Сер.2. Полупроводниковые приборы. – М.: ЦНИИ "Электроника", 1989, вып.4.
4. **Лосев В.В., Лубегин Г.В., Орлов Б.М.** Характеристики фотоприемников на основе твердых растворов соединений $Zn_xCd_{1-x}S$ для УФ- и видимой областей спектра. – Изв. вузов. Электроника, 2002, №6.



"ПЛАСТИКОВЫЕ" СОЛНЕЧНЫЕ БАТАРЕИ

В феврале 2011 года в ФИАНе состоялась лекция Алана Хигера, лауреата Нобелевской премии по химии (2000 год), "Пластиковые" солнечные батареи: самосборка массивных наноматериалов с гетеропереходами путем самопроизвольного фазового разделения». Введя слушателей в краткую историю открытия и исследования полимерных проводящих материалов, Хигер перешел к концепции построения пластиковых батарей, которая состоит из трех стадий. Первая – это создание материалов с большим коэффициентом поглощения фотонов, вторая – преобразование энергии фотонов в электрическую энергию через разделение зарядов по знакам, третья – самосборка зарядов (self-assembly), ранее разделенных.

Идея использовать углеродные наноструктуры в качестве основы солнечных батарей благодаря их уникальным электрическим и оптическим характеристикам была реализована многими авторами. Однако коэффициент преобразования энергии ИК-излучения в электричество составляет доли и единицы процентов. Исходя из экономических требований снижения стоимости производства, группа под руководством Хигера синтезировала чернила, представляющие собой молекулярные растворы полимеров с высокой абсорбцией фотонов. Эти органические полимерные материалы, обладая электропроводностью, сравнимой с металлами, оптически прозрачны и наносится на основу полиграфическими методами. Производство солнечных батарей на их основе окупится за два месяца, в то время, как использование других методов – за три года.

Смесь полимерных волокон с фуллеренами позволяет разделенным зарядам следовать разными маршрутами: электронам – по фуллеренам, дыркам – по полимерным волокнам. Такая конструкция подавляет рекомбинацию зарядов. Хигер заменил фуллерен C_{64} на C_{84} , у которого уровень Ферми находится ниже на 0,3 эВ, чем у C_{64} . В результате снижается напряжение открытого контура U_{oc} и соответственно уменьшается вероятность рекомбинации зарядов. Но остается нерешенной проблема низкой эффективности преобразования солнечного света – всего 6%, а ведь у кремниевых батарей он намного выше. Хигер связывает это с недостатками морфологии структуры смеси полимер-фуллерен, процессе создания которой пока невозможно контролировать. Объемную морфологию он исследует с помощью конфокального фазово-контрастного микроскопа.

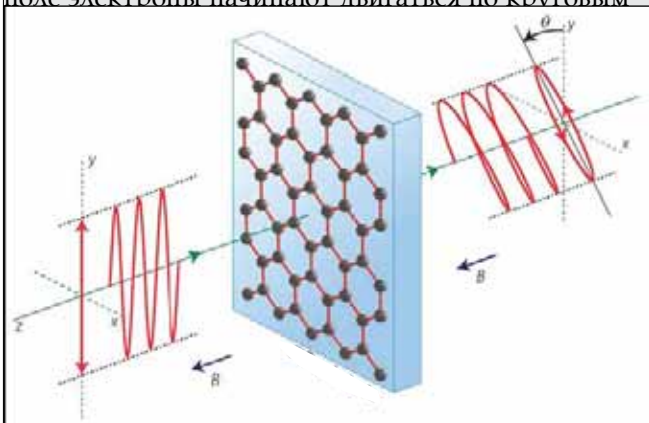
Дальнейшее направление своей работы Хигер видит в улучшении структуры фазового состава смеси полимер-фуллерен для отдельной маршрутизации зарядов разных знаков. Отвечая на вопросы слушателей, что лучше подходит для задач фотовольтаики: графен или фуллерен, – он ответил: "Вопрос не в том, что лучше на сегодняшний день, а что возможно получить в будущем, когда технология будет развита". А в том, что полимерная прозрачная и гибкая композиция лучше хрупкой металлооксидной, у него сомнений нет.

Н.Истомина



ГРАФЕН: КРУТОЙ ПОВОРОТ В МАГНИТООПТИКЕ

Графен не перестает удивлять исследователей своими свойствами, опровергая представления, устоявшиеся в физике твердого тела. С очередным сюрпризом встретилась группа ученых из Швейцарии и Германии, изучавшая с помощью оптических методов особенности динамики электронов и дырок в графене, помещенном в магнитное поле. Об этом сообщалось в работе: Crassee I. et al. - Nature Phys., 2011, №7, p.48. В качестве измеряемой характеристики они выбрали угол вращения плоскости поляризации света (магнитооптический эффект Фарадея). В обычных магнитооптических материалах угол фарадеевского вращения пропорционален оптическому пути и составляет единицы градусов на длине порядка десяти микрон. Каково же было изумление ученых, когда обнаружилось (см. рисунок), что поворот плоскости поляризации инфракрасного излучения на одном лишь атомном слое графена составляет внушительные 6 градусов! Гигантский эффект Фарадея авторы названной работы связывают с циклотронным резонансом: в магнитном поле электроны начинают двигаться по круговым



Магнитооптический эффект Фарадея на одном слое графена: поворот плоскости поляризации θ – около 6 градусов в магнитном поле 7 Т

орбитам. Подобное явление наблюдается в двумерных электронных газах, реализующихся в полупроводниковых гетероструктурах, однако те же углы фарадеевского вращения набираются светом при прохождении сквозь слой, по толщине в десятки раз превышающий графен. Здесь сказывается специфика дисперсионных свойств электронов в графене: они ведут себя, как безмассовые частицы (дираковские фермионы), скорость которых не зависит от энергии. Проявляется это и в неэквидистантном расположении уровней Ландау, переходы между которыми определяют частоты циклотронного резонанса и влияют на прохождение поляризованного света. У графена есть еще одно преимущество перед полупроводниковыми конкурентами - степень его легирования и даже тип проводимости могут изменяться под действием электрического поля, что позволяет не только перестраивать частоту циклотронного резонанса, но и переключать знак эффекта. Это позволит создавать миниатюрные невзаимные оптические элементы (устройства, пропускающие свет в одном направлении и не пропускающие в противоположном). Они будут переключаться с частотой, недоступной для ныне используемых ячеек Фарадея, управляемых инерционными и громоздкими катушками индуктивности. Возможность управления с помощью электрического поля компенсирует также и тот недостаток, что углы вращения в несколько градусов наблюдаются в графене при достаточно больших полях. Однако проблемы еще остаются. В частности, для создания дисплеев желательно получать угол вращения 90 градусов. Эффект Фарадея от многослойного графена, как показано в той же упоминаемой работе, не является простой суммой эффектов в каждом слое и может быть даже меньше, чем в монослое.

А.Пятаков (Печатается с разрешения «ПерсТ»)