

У. Е. ТУРОВЕЦ, А. А. ПОЗНЯК, С. М. ЗАВАДСКИЙ, С. В. ГРАНЬКО, А. Н. ПЛИГОВКА

ВЛИЯНИЕ ЭЛЕКТРОННО-БЛОКИРУЮЩЕГО СЛОЯ НА ТРАНСПОРТ ЗАРЯДОВ В АКТИВНУЮ ОБЛАСТЬ ИК-СВЕТОДИОДА НА КОЛЛОИДНЫХ КВАНТОВЫХ ТОЧКАХ PbS

Предложен подход для улучшения яркости и стабильности ИК-светодиода за счет балансировки носителей заряда с помощью ультратонкого электронно-блокирующего слоя из оксида алюминия. Такой подход позволил улучшить яркость – $7,42 \text{ Вт} \cdot \text{м}^2 \cdot \text{ср}^{-1}$ при длине волны 1300 нм и стабильность – более 144 часов.

В современных тонкопленочных ИК-светодиодах присутствует определенный ряд недостатков. В работах [1–3] авторов, разрабатывающих ИК-светодиоды на коллоидных квантовых точках (ККТ) PbS, отмечаются следующие методы улучшения работы устройства: настройка расстояния между ККТ PbS в результате замены органических лиганд, использование структуры ядро-оболочка и встраивание ККТ PbS в перовскитную матрицу. Однако одной из ключевых проблем остается неравновесный транспорт носителей заряда в активную область [4; 5].

Эффективная рекомбинация происходит при сопоставимой концентрации электронов и дырок. В современных ИК-светодиодах электронно-транспортные и дырочно-транспортные слои имеют различную концентрацию и подвижность носителей заряда [2; 3]. Уменьшение количественного превосходства электронов по сравнению с дырками может быть достигнуто путем введения специального блокирующего слоя; для повышения подвижности дырок используются специальные инжектирующие слои [4]. В качестве эффективного электронно-блокирующего слоя (ЭБС) для ИК-светодиода может быть использован ультратонкий слой оксида алюминия (ОА) [5] или другого вентильного металла [6; 7]. ОА был выбран вследствие его широко известных изоляционных свойств, применяющихся в тонкопленочных транзисторах и конденсаторах [6].

Методом атомно-слоевого осаждения (АСО) в тестовых структурах ИК-светодиода на ККТ PbS были сформированы два ЭБС ОА толщиной 1,5 и 3 нм. В качестве контрольной группы использовали структуру без ЭБС. Температура поверхности подложки составляла 100 °С, в качестве источника алюминия использовался триметилалюминий, а в качестве источника кислорода – вода. Толщина слоя определялась по количеству циклов и известной скорости осаждения, которая составляла $\sim 1 \text{ \AA} \cdot \text{цикл}^{-1}$.

Структура тестового ИК-светодиода представляла собой следующую последовательность функциональных слоев: стеклянная подложка с оксидом цинка-олова (ITO) 70–80 нм, слой оксида цинка (ZnO), выполняющий роль электронно-транспортного слоя, 25–30 нм, ЭБС ОА 1,5 или 3 нм, слой ККТ PbS $\sim 47,5$ нм,

органический полимер 4,4'-бис(карбазол-9-ил) бифенил (СВР), выполняющий роль дырочно-транспортного слоя, 60 нм, слой оксида молибдена (MoO_3), выполняющий роль слоя инжекции дырок, 3 нм и электрод из золота (Au) 100 нм.

Принцип работы тестового ИК-светодиода заключается в следующем: после приложения положительного потенциала на анод (ITO) и отрицательного на катод (Au), генерируются свободные основные и неосновные носители заряда (электроны и дырки), которые движутся навстречу друг другу. Затем электроны попадают в слой электронно-транспортный слой ZnO, проходят через ЭБС ОА. Дырки попадают сначала в слой инжекции дырок MoO_3 , который увеличивает количество неосновных носителей заряда, а затем в дырочно-транспортный слой СВР. Пройдя эти слои, дырки и электроны встречаются в активном слое ККТ PbS. Происходит процесс рекомбинации, способствуя высвобождению кванта света.

Увеличение толщины ЭБС ОА приводит к возникновению более высокого барьера для электронов на пути в активную область с ККТ PbS, что уменьшает количество избыточных электронов, а также нежелательную передачу энергии от экситонов к свободным электронам на границе раздела ZnO/PbS (рис. 1).

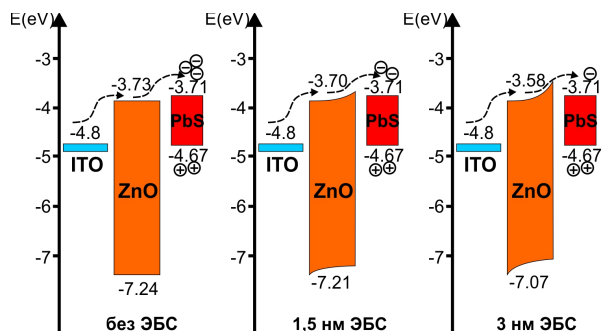


Рисунок 1 – Энергетическая диаграмма слоя ZnO и влияние на него ЭБС ОА с различными толщинами: без ЭБС, 1,5 нм и 3 нм соответственно

Более того, ультратонкий ЭБС является идеальным условием для осаждения последующего слоя ККТ PbS благодаря уменьшению шероховатости поверхности слоя ZnO. Кроме того, ЭБС выполняет функцию защиты от влаги и кислорода, предотвращая преждевременную деградацию излучающего слоя.

В структуре без ЭБС максимальная яркость составляла $2,14 \text{ Вт} \cdot \text{м}^{-2} \cdot \text{ср}^{-1}$, а максимальное значение ВКЭ – 0,1 %. Во всех трех структурах пик электролюминесценции находился на длине волны 1300 нм, что соответствует ближнему ИК диапазону. Анализ структур с ЭБС показал значительное улучшение характеристик ИК-светодиода. Максимальная яркость структуры была достигнута при использовании ЭБС толщиной 1,5 нм и составила $7,42 \text{ Вт} \cdot \text{м}^{-2} \cdot \text{ср}^{-1}$, структура с ЭБС ОА 3 нм показала величину яркости $4,5 \text{ Вт} \cdot \text{м}^{-2} \cdot \text{ср}^{-1}$. Для ЭБС 1,5 и 3 нм максимальное значение ВКЭ-характеристики не показало значительного улучшения и составляла $\sim 0,2 \%$. ИК-светодиод с ЭБС 1,5 и 3 нм оставался стабильным более 144 часа при отклонении пиковой яркости не более чем на 10 %.

В полученных структурах так же была проведена оценка ВАХ и влияние на нее изменения толщины ЭБС ОА. Так, в структуре без ЭБС включение устройства наблюдается при напряжении 3,5 В и плотности тока $\sim 10^{-3} \text{ А} \cdot \text{см}^{-2}$. В структурах с 1,5 нм ЭБС в диапазоне напряжений 2,1–5 В плотность тока превышала значения плотности тока для структур без ЭБС, что может быть связано со значительно более ранним включением устройства и повышенным рекомбинационным током прибора. Наименьшее значение плотности тока при включении устройства показала структура с ЭБС толщиной 3 нм, оно составило $10^{-5} \text{ А} \cdot \text{см}^{-2}$. Данная структура также демонстрировала наименьшую плотность тока на всем диапазоне приложенных напряжений.

Таким образом, экспериментально полученные результаты показывают, что использование ЭБС ОА позволяет увеличить яркость устройства до $7,42 \text{ Вт} \cdot \text{м}^{-2} \cdot \text{ср}^{-1}$, что в 3,45 раз выше, чем в устройстве без ЭБС, и без ухудшения ВКЭ и временной стабильности. Дальнейшие исследования по повышению эффективности ИК-светодиодов на ККТ PbS путем введения в конструкцию ЭБС приближают возможность их коммерциализации. Применение таких светодиодов позволило бы найти экономичную замену твердотельным ИК-светодиодам в приборных приложениях устройств ночного видения, волоконно-оптической связи и биодиагностики и др.

Список литературы

1. Near-infrared lead chalcogenide quantum dots: Synthesis and applications in light emitting diodes / Haochen Liu [et al.] // Chinese Phys. B. – 2019. – Vol. 28. – P. 128504.
2. High-efficiency colloidal quantum dot infrared light-emitting diodes via engineering at the supra-nanocrystalline level / S. Pradhan [et al.] // Nature Nanotechnology. – 2018.

3. High-Performance Shortwave-Infrared Light-Emitting Devices Using Core-Shell (PbS-CdS) Colloidal Quantum Dots / G. Supran [et al.] // *Advanced Materials*. – 2015. – Vol. 27, Iss. 8. – P. 1437–1442.
4. Highly stable QLEDs with improved hole injection via quantum dot structure tailoring / W. Cao [et al.] // *Nature Communications*. – 2018. – Vol. 9. – P. 2608.
5. Bright infra-red quantum dot light-emitting diodes through efficient suppressing of electrons / M. Marus [et al.] // *Appl. Phys. Lett.* – 2020. – Vol. 116, Iss. 19. – P. 191103-1.
6. Michaelis, A. Valve Metal, Si and Ceramic Oxides as Dielectric Films for Passive and Active Electronic Devices / A. Michaelis // *Advances in Electrochemical Science and Engineering* / A. Michaelis ; under edit. Prof. Richard C. Alkire [et al.]. – Wiley, 2008. – Vol. 10, ch. 1. – P. 1–106.
7. Poznyak, A. On-Aluminum and Barrier Anodic Oxide: Meeting the Challenges of Chemical Dissolution Rate in Various Acids and Solutions / A. Poznyak, A. Pligovka, U. Turavets, M. Norek // *MDPI: Coatings*. – 2020. – Vol. 10, Iss. 9. – P. 875.

The charge-carrier imbalance in IR QLEDs greatly limits the performance, which in turn narrows the scope of application. The work proposed an approach for improving the brightness and stability of IR PbS QLEDs through balancing the device current by an ultra-thin inorganic alumina electron suppressing layer. The result is $7.42 \text{ W}\cdot\text{sr}^{-1}\cdot\text{m}^2$ peak radiance at $1,3 \mu\text{m}$ wavelength and DC stability for over 144 h.

Туровец Ульяна Егоровна, студентка II ступени образования, Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники, Минск, Республика Беларусь, websulya@gmail.com.

Позняк Александр Анатольевич, кандидат физико-математических наук, доцент, Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники, Минск, Республика Беларусь, roznyak@bsuir.by.

Завадский Сергей Михайлович, кандидат технических наук, доцент, Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники, Минск, Республика Беларусь, szavad@bsuir.by

Гранько Сергей Владимирович, кандидат технических наук, Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники, Минск, Республика Беларусь, granko@bsuir.by.

Научный руководитель – *Плиговка Андрей Николаевич*, кандидат технических наук, старший научный сотрудник НИЛ 4.10 «Нанотехнологии», Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники, Минск, Республика Беларусь, pligovka@bsuir.by.