

УДК 537.9, 620.91

ВЛИЯНИЕ ИНТЕНСИВНОСТИ ОСВЕЩЕНИЯ НА РАСПРЕДЕЛЕНИЕ ЛОВУШЕЧНЫХ СОСТОЯНИЙ В СЛОЯХ НАНОКРИСТАЛЛОВ PbS

Онищук Д. А. (Университет ИТМО)

Научный руководитель – к.т.н., доцент кафедры ОФиСЕ Парфенов П. С.
(Университет ИТМО)

В работе рассматривается распределение ловушечных состояний в запрещенной зоне пленок нанокристаллов сульфида свинца, обработанных 1,2-этандитиолом и тетрабутиламмоний йодидом, и влияние освещения на регистрируемую величину плотности состояний. Также анализируется применимость метода исследования ловушечных состояний, основанного на анализе частотно-емкостных характеристик солнечных элементов.

Введение. В настоящее время большое число исследований направлено на повышение эффективности солнечных элементов (СЭ). Различные исследователи используют сложные архитектуры СЭ, а также новые перспективные материалы, такие как нанокристаллы (НК), перовскиты, а также различные полимеры, все это открывает большие возможности для создания новых гибридных, гибких и дешевых в производстве СЭ. Однако материалам на основе наноструктур свойственно образование большого числа дефектов и энергетических состояний внутри ЗЗ, особенно при организации в объемные структуры. Образовавшиеся дефекты могут негативно сказаться на эффективности СЭ, так как могут приводить к нежелательной рекомбинации носителей заряда. Причины возникновения ловушечных состояний различны, это и структурные неоднородности, и флуктуации состава НК, образующиеся как при синтезе, так и при окислении и деградации НК. При этом деградация НК может происходить локально, создавая флуктуации потенциала на краях энергетических зон и образуя хвосты плотности состояний. При этом участки с большей шириной запрещенной зоны будут обладать меньшей подвижностью носителей заряда и тем самым создавать флуктуации в переносе заряда.

В работе исследовано образование ловушечных состояний в запрещенной зоне слоев нанокристаллов сульфида свинца с различной пассивацией поверхности, а также влияние освещения на регистрируемую величину плотности состояний. Тетрабутиламмоний йодид (ТВАИ) и 1,2-этандитиол (EDT) выбраны как наиболее широко распространенные лигандные оболочки для НК сульфида свинца, применяемые при изготовлении СЭ и позволяющих добиться преобладающего n и p-типа проводимости соответственно.

Основная часть. В работе использовались НК PbS диаметром $\sim 3,4$ нм с максимумом поглощения на 934 нм (которые обычно используют для изготовления СЭ, так как в полосу их поглощения попадает весь видимый диапазон и часть ближнего ИК), пересаженные в октане. НК наносили методом спин-коатинга (25 мкл, 3000 об/мин) на ИТО подложки с 6 контактными площадками от «Ossila», замена олеатных лигандов на ТВАИ и EDT проводилась в твердой фазе методом спин-коатинга (50 – 60 мкл + 15 сек, 3000 об/мин), для смыва излишков лигандов использовали ацетонитрил. Для проведения исследования изготовлено по 2 образца различной толщины с каждым типом лигандной оболочки: EDT – 160 и 80 нм, ТВАИ – 135 и 75 нм, все образцы изготавливались на воздухе. Напыление золотых электродов проводили методом магнетронного напыления на «Quorum Q150T ES». Измерение спектров импеданса проводили при помощи прецизионного измерителя «Keysight E4980A». Измерение ВАХ проводили при помощи «Ossila I-V Test System». Плотность состояний (DOS, Density of states) вычислялась из емкостно-частотной характеристики образцов. Для исследования влияния освещения использовалась галогенная лампа (интенсивность 500 Вт/м²) и набор нейтральных сетчатых светофильтров (с пропусканием 40% каждый).

Для эффективной работы СЭ необходимо что бы образующиеся при поглощении падающего излучения экситонные пары разделялись и доходили строго до соответствующих электродов. Ловушечные состояния могут «захватывать» движущиеся к электродам заряды, что приведет

к падению эффективности СЭ. Распределение состояний DOS анализируется в темноте, абсолютное положение уровней энергии на данном этапе не выяснялось, поэтому далее относительные значения. На уровне 0,26 эВ для более толстых образцов концентрация оказалась одинаковой (10^{16} эВ⁻¹×см⁻³), но на самом краю, при 0,3 эВ, для EDT была в полтора раза выше, что подтверждает худшую защиту нанокристаллов с помощью EDT. В случае тонких образцов концентрация дефектных состояний оказалась выше, чем у толстых, что можно связать с тем, что они быстрее окисляются. На краю диапазона измерений она уже составляла 10^{17} и 2×10^{17} эВ⁻¹×см⁻³ для TBAI и EDT соответственно. Под действием света регистрируемая величина DOS существенно выросла, причем сильнее всего у образцов TBAI (на краю диапазона примерно 3×10^{18} для «толстого» и вдвое меньше для «тонкого»). Для «толстого» образца с EDT она составила 2×10^{17} (данные для «тонкого» образца EDT составили около 2×10^{18} , но их анализ осложнялся большими диэлектрическими потерями (омическими утечками), что могло исказить полученные результаты). Заметим, что рост показаний DOS вызывается как увеличением числа вакансий (из-за образования свободных зарядов), так и увеличением вероятности перехода на дефектное состояние и из него. Данные спектроскопии импеданса показывают, что проводимость образцов росла линейно освещенности, то есть концентрация свободных носителей росла также линейно. В то же время значения DOS у образцов менялись по-разному. Мы считаем, что меньшая величина при освещении у тонкого образца TBAI и образца с EDT связаны с большим уровнем дефектов, препятствующих транспорту зарядов, образующихся при поглощении излучения.

Также отметим, что данные CV демонстрируют, что ширина обедненного слоя превышает геометрические размеры устройств во всех случаях, что является преимуществом при разделении зарядов. Дополнительно показано, что низкочастотная часть емкостно-частотой характеристики описывает плотность распределения состояний, в то время как высокочастотная связана с электрическими свойствами солнечного элемента и измерительной цепи.

Выводы. Нанокристаллы сульфида свинца, обработанные EDT, отличаются большим уровнем дефектов, чем TBAI. Показано, что это влияет на динамику зарядов, образующихся при поглощении света.

Онищук Д. А. (автор)

Подпись

Парфенов П. С. (научный руководитель)

Подпись