

Эмиссия фотонов при взаимодействии электронов с поверхностью наногетероструктур

Л.М. Маркович*, М.И. Линтур, М.В. Приходько, Г.Ю. Подгорецкая

Ужгородский национальный университет, ул. Пидгирна, 46, 88000 Ужгород, Украина

(Получено 30.11.2016; в отредактированной форме – 30.01.2017; опубликовано online 30.06.2017)

Получено количественные данные о спектральном составе и интенсивность излучения в диапазоне 200 – 800 нм при облучении электронами с энергией $E_n = 450$ эВ пленок As_2S_3 и многослойных пленок Se/As_2S_3 , Te/As_2S_3 и Bi/As_2S_3 . Установлено природу излучателей основных компонент, которые выявлены в исследуемых спектрах, а также место локализации наблюдаемого свечения. Важным результатом работы является определение абсолютного выхода фотонов с поверхности исследуемых образцов, которые составляют соответственно для As_2S_3 $N_1 = 1.75 \cdot 10^{-3}$ фот./эл., $N_2 = 7.57 \cdot 10^{-4}$ фот./эл. для многослойных пленок $N_3 = 1.8 \cdot 10^{-3}$ фот./эл., $N_4 = 8.8 \cdot 10^{-4}$ фот./эл., $N_5 = 1.3 \cdot 10^{-3}$ фот./эл.

Ключевые слова: Электронно-фотонная спектроскопия, Фотон, Электрон, Бомбардировка, Эмиссия.

DOI: [10.21272/jnep.9\(3\).03012](https://doi.org/10.21272/jnep.9(3).03012)

PACS number: 78.68. + m

1. ВВЕДЕНИЕ

В начале нового столетия мы становимся свидетелями больших достижений квантовой инженерии в электронике твердого тела, которая создает искусственные атомы – квантовые точки и приборы на их основе, а также объекты, не имеющих аналогов в природе, разрабатывает методы управления движением единичных электронов, и делает то, что раньше считалось невозможным. Логика современного этапа развития физики состоит в том, что основными объектами исследований все в большей мере становятся не монокристаллы, не отдельные пленки, а сложные наноструктурные материалы.

Упаковывая атомы с точностью до одного двух слоев, можно создать искусственные кристаллы, молекулы с заданными свойствами. Многослойные тонкие пленки имеют большое количество интересных свойств, потому что в таких материалах, вследствие уменьшения размеров и возрастающей роли поверхности, наблюдаются отклонения от их поведения в объемных материалах. Можно выделить две основные физические причины для объяснения отличий в свойствах многослойных материалов и объемных твердых телах. Первая причина – это высокая дисперсность нанокристаллических систем, то есть приблизительно одинаковое число атомов на поверхностях или границах зерен кристаллических областей и число атомов, размещенных в середине кристаллической частицы. Другая причина – очень мелкие нанометровые размеры частиц: длина волны де Бройля электронов (дырок) в этом случае становится соразмерной с размером зерна кристаллита. Кинетическая энергия теплового движения электронов и дырок $E \approx 0,025$ эВ, соответственно длина волны электрона приблизительно 8 нм, а для дырок 3 нм. При этих условиях поведение носителей заряда объясняется квантово-механически как частиц потенциальной ямы. Потому в этом новом состоянии вещества зоны проводимости и валентности перестают быть непрерывными, они расщепляются на дискретные электронные уровни, а запрещенная

зона возрастает с уменьшением размера структуры. Вследствие этого появляются дискретные линии оптического поглощения и люминесценции, наблюдаются эффекты туннелирования между квантовыми состояниями соседних ям, то есть в целом меняются оптические свойства вещества.

Высокая прозрачность в инфракрасной области спектра, эффекты перемигания и индуцированных изменений стали основой применения халькогенидных стеклоподобных полупроводников (ХСН) в голографии, электронике, оптической записи. Большой интерес вызывает возможность использования ХСН в качестве сред для разработки автомобильных систем ночного видения, термического отображения информации, квантового считывания и т.д. Нами было исследовано пленки As_2S_3 и многослойные пленки Se/As_2S_3 , Te/As_2S_3 и Bi/As_2S_3 методом электронно-фотонной спектроскопии (ЕФС). Выбор этих образцов обусловлен тем, что, в отличие от оптических методов исследования [1, 2], взаимодействие электронов с поверхностью ХСН почти не изучалось.

2. ТЕХНИКА И МЕТОДИКА

Исследования взаимодействия электронов с поверхностями пленок As_2S_3 , напыленных на стеклянную и кремниевую подложки, Se/As_2S_3 , Te/As_2S_3 и Bi/As_2S_3 проводились на “Сверхвысоковакуумном электронно-фотонном спектрометре” в диапазоне длин волн 200 – 800 нм, где исследуемые образцы облучались электронами с энергией $E_n = 450$ эВ под углом 15° относительно нормали к поверхности. Остаточное давление атмосферных газов в рабочей камере установки составляло $P \sim 10^{-9}$ Торр, электронный ток на мишени $I_{эл.} = 1,85 - 2$ мкА. Свечение, которое возникает при взаимодействии электронов с поверхностью, фокусируется линзой на входную щель монохроматора МДР-12, где выделенное излучение детектируется фотоэлектронным умножителем ФЭУ-106, работающим в режиме счета отдельных фотоэлектронов. Полезный сигнал регистрируется частотомером и записывается спектр исследуемого

* pnilfe_lyuba@mail.ru

излучения с помощью самописца КСП-4. Поскольку в монохроматоре МДР-12 в исследуемом диапазоне длин волн 200 – 800 нм используются две дифракционные решетки, то кривая относительной чувствительности измерялась для обеих решеток №1 в диапазоне 200 – 500 нм и №2 в диапазоне 400 – 1000 нм.

Калибровку системы регистрации осуществляли с помощью эталонных источников неполяризованного излучения, а именно: вольфрамовой лампы СИ-8-200 (для спектральной области 350 – 800 нм) и газоразрядной водородной лампы ДВС-25 (для области 200 – 350 нм). Истинное спектральное распределение вольфрамовой лампы СИ-8-200 рассчитывали по формуле Планка для заданной известной температуры T ее ленты с учетом излучательных свойств серого тела. Спектр, записанный для лампы ДВС-25, “сшивали” с распределением интенсивности вольфрамовой лампы СИ-8-200. Определенная таким способом кривая относительной чувствительности системы регистрации излучения сверхвысоковакуумного электроно-фотонного спектрометра представлена на рис. 1.

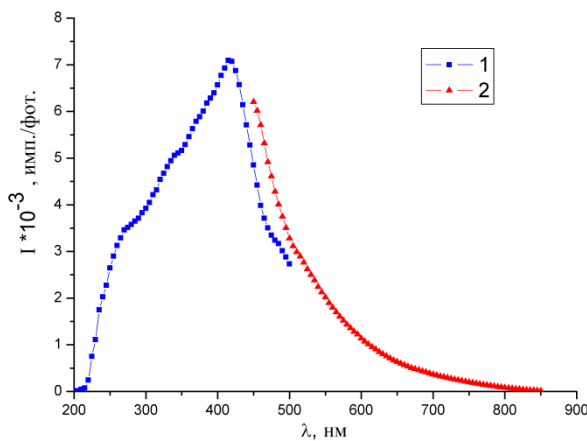


Рис. 1 – Кривая чувствительности системы регистрации излучения. 1 – решетка в диапазоне 200 – 500 нм; 2 – в диапазоне 400 – 1000 нм

Абсолютный выход фотонов с облучаемой электронами поверхности для выбранной длины волны определяли по формуле:

$$N \left[\frac{\text{Фот}}{\text{с} \cdot \text{нм}} \right] = \frac{I_{\text{экс.}}(\lambda) \cdot S \cdot 2\pi}{\beta(\lambda) \cdot S_{\text{экс.}} \cdot I_{\text{эл.}} \cdot \Omega \cdot D \cdot \Delta\ell_{\text{экс.}}}, \quad (1)$$

где $I_{\text{экс.}}(\lambda)$ – интенсивность излучения в относительных единицах для данной λ ; $\beta(\lambda)$ – коэффициент чувствительности системы регистрации для данной λ ; S – площадь пучка электронов на поверхности исследуемого образца; $S_{\text{экс.}}$ – площадь, с которой наблюдаем свечение поверхности исследуемого образца; $I_{\text{эл.}}$ – ток электронного пучка; Ω – телесный угол наблюдения излучения; D – обратная линейная дисперсия монохроматора МДР-12; $\Delta\ell_{\text{экс.}}$ – ширина входной щели монохроматора [3].

3. РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Спектры свечения поверхности пленок As_2S_3 , напыленных на стекло и кремний, приведенные на кривую чувствительности системы регистрации

(рис. 1) представлены в абсолютных единицах на рис. 2.

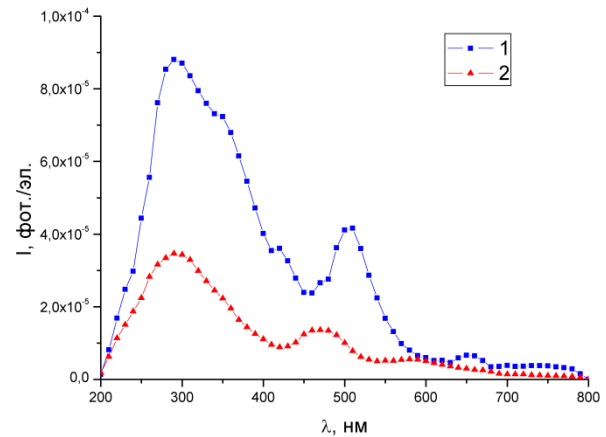


Рис. 2 – Электроно-фотонная эмиссия поверхности пленки As_2S_3 , с учетом чувствительности системы регистрации, напыленной на: 1 – стеклянную подложку; 2 – кремниевую подложку

В обоих случаях наблюдаем непрерывное излучение в широком диапазоне длин волн с двумя четко выраженными максимумами $\lambda_1 = 300$ нм и $\lambda_2 = 500$ нм. Непрерывное излучение с максимумом вблизи $\lambda_1 = 300$ нм, считаем, соответствует межзонным переходам. Излучение с максимумом $\lambda_2 = 500$ нм связываем с возбуждением электронным пучком “дефектных” кластеров, а именно AsS_3 , As_4S_4 и As_2S_5 , которые характерны не только для пленок, но и для массивного аморфного образца As_2S_3 . Мы считаем, что поверхность, на которую напылен данный объект, вносит весомый вклад в спектрограмму свечения пленок As_2S_3 . На это указывают отличия в спектрограммах ЭФЭ пленок As_2S_3 , а именно, смещение максимума непрерывного излучения ($\lambda = 300$ нм) для As_2S_3 , напыленного на кремниевую подложку, в коротковолновую область длин волн по отношению к As_2S_3 , напыленного на стеклянную подложку. В пользу этой гипотезы свидетельствует также наличие в спектре пленок As_2S_3 на кремнии особенности при длине волны $\lambda = 280$ нм, которая соответствует максимуму непрерывного излучения для поверхности кремния. Энергетическое положение этого максимума соответствует энергии квантов межзонных переходов кремния, в частности переходам электронов с поверхностных электронных состояний к объемным состояниям зоны Бриллюэна ($S_4 - \Gamma_2$). Вероятно, максимум при $\lambda = 420$ нм, в спектре свечения пленки As_2S_3 , напыленной на стекло, соответствует особенности, которая характерна для спектрограммы стекла марки К-8.

Сравнивая кривые 1 и 2 рис. 2, видно, что интенсивность излучения I с поверхности As_2S_3 , напыленного на стеклянную подложку, почти в три раза больше, чем с поверхности пленки As_2S_3 напыленной на кремний. Это связываем с тем, что вклад в спектр свечения As_2S_3 стеклянной подложки намного больший, чем кремниевой.

Пользуясь методикой, которая описана выше, мы получили данные абсолютного выхода фотонов на

один падающий электрон при взаимодействии электронов средних энергий с поверхностью пленки As_2S_3 , напыленной на стекло марки К-8 (N_1) и кремний высокой чистоты (N_2), в диапазоне длин волн 200 – 800 нм:

$$N_1 = 1,75 \cdot 10^{-3} \text{ фот./эл.}, N_2 = 7,57 \cdot 10^{-3} \text{ фот./эл.}$$

Спектры свечения поверхности многослойных пленок Se/As_2S_3 , Te/As_2S_3 та Bi/As_2S_3 приведенных на кривую чувствительности системы регистрации в абсолютных единицах, которые получены по формуле (1) представлены на рис. 3.

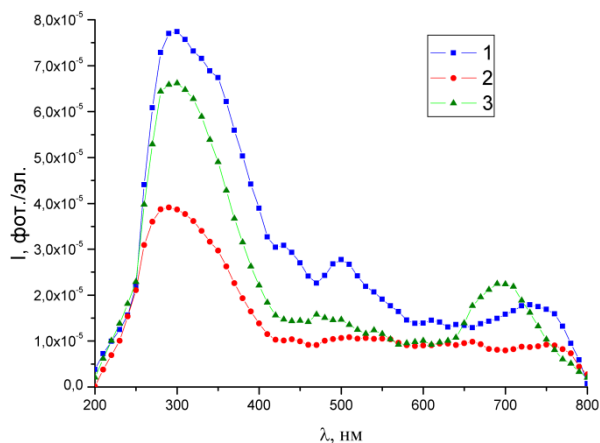


Рис. 3 – Электронно-фотонная эмиссия многослойной пленки с учетом чувствительности системы регистрации: 1 – Se/As_2S_3 ; 2 – Te/As_2S_3 ; 3 – Bi/As_2S_3

Для всех спектров наблюдаем непрерывное Для всех спектров наблюдаем непрерывное излучение в широком диапазоне длин волн с максимумами близко $\lambda_1 = 300$ нм и $\lambda_2 = 750$ нм, а в случае Se/As_2S_3 – пик свечения при $\lambda_3 = 500$ нм. Непрерывное излучение с максимумом $\lambda_1 = 300$ нм, которое наблюдается во всех спектрах, имеет одинаковую природу. Его по механизму связываем с электронными межзонными переходами в пленках As_2S_3 . Спектральная особенность при длине волны $\lambda = 500$ нм также характерна

для пленок As_2S_3 и соответствует излучению „дефектных” кластеров AsS_3 , As_4S_4 и As_2S_5 , которые возбуждаются бомбардирующими электронами. Непрерывное излучение с максимумом близко $\lambda_2 = 750$ нм, по нашему мнению, это свечение дефектов, которые возникают на границе между двумя слоями (Se и As_2S_3 , Te и As_2S_3 , Bi и As_2S_3) вследствие их перемещения под воздействием пучков электронов [4].

Используя значения, которые представлены на рис. 3, мы вычислили абсолютный суммированный выход фотонов с поверхности многослойных пленок Se/As_2S_3 , Te/As_2S_3 та Bi/As_2S_3 на один падающий электрон в диапазоне длин волн от 200 до 800 нм, который составляет соответственно:

$$N_3 = 1,8 \cdot 10^{-3} \text{ фот./ эл.},$$

$$N_4 = 8,8 \cdot 10^{-4} \text{ фот./ эл.},$$

$$N_5 = 1,3 \cdot 10^{-3} \text{ фот./эл.}$$

4. ВЫВОДЫ

Исследован спектральный состав излучения в диапазоне 200 – 800 нм при бомбардировке поверхности пленок As_2S_3 , напыленных на стекло и кремний, а также поверхности многослойных пленок Se/As_2S_3 , Te/As_2S_3 и Bi/As_2S_3 электронами.

Получено спектры свечения поверхности пленок As_2S_3 напыленных на кремний высокой чистоты и стекло марки К-8, определено место локализации и природу непрерывного излучения с максимумами вблизи $\lambda_1 = 300$ нм и $\lambda_2 = 500$ нм. Приведено спектрограммы излучения пленок As_2S_3 на кривую чувствительности системы регистрации и определено абсолютный выход фотонов в диапазоне длин волн 200 – 800 нм.

Исследовано взаимодействие электронов средних энергий с поверхностью многослойных наногетероструктур Se/As_2S_3 , Te/As_2S_3 та Bi/As_2S_3 , объяснена природа особенностей непрерывного спектра для данных образцов определен абсолютный выход фотонов с поверхности многослойных пленок Se/As_2S_3 , Te/As_2S_3 та Bi/As_2S_3 в диапазоне длин волн 200 – 800 нм.

Emission of Photon Under Electron Sinteraction with the Surface Nano Hetero Structures

L. Markovych, M. Lintur, M. Prichodko, G. Podgoretska

Uzhgorod National University, 46, Pidgirna Str., 88000 Uzhgorod, Ukraine

For the first time quantitative data and intensity of radiation in the range of 200 – 800 nm is received by electron-photonspectroscopy irradiated by electrons with energies $E_n = 450$ eV and films As_2S_3 and multilayer films Se/As_2S_3 , Te/As_2S_3 and Bi/As_2S_3 . The nature of emission accompanying electron bombardment studied and also a place of localization related to observed glow. Important result of the study is to determine the absolute output of photons from surface samples, which are respectively for As_2S_3 $N_1 = 1.75 \cdot 10^{-3}$ phot./el., $N_2 = 7.57 \cdot 10^{-4}$ phot./el. for the multilayer films of $N_3 = 1.8 \cdot 10^{-3}$ phot./el., $N_4 = 8.8 \cdot 10^{-4}$ phot./el. and $N_5 = 1.3 \cdot 10^{-3}$ phot./el.

Keywords: Electron-photon spectroscopy, Photon, Electron, Bombardment, Emission.

Емісія фотонів при взаємодії електронів з поверхнею наногетеро структур

Л.М. Маркович, М.І. Лінтур, М.В. Приходько, Г.Ю. Подгорецька

Ужгородський національний університет, вул. Підгірна, 46, 88000 Ужгород, Україна

Одержано кількісні дані про спектральний склад та інтенсивність випромінювання в діапазоні 200 – 800 нм при опроміненні електронами з енергією $E_{\text{п}} = 450$ еВ плівок As_2S_3 та багатошарових плівок $\text{Se}/\text{As}_2\text{S}_3$, $\text{Te}/\text{As}_2\text{S}_3$ та $\text{Bi}/\text{As}_2\text{S}_3$. Встановлено природу випромінювачів основних компонент, які виявлено в досліджуваних спектрах, а також місце локалізації спостережуваного світіння. Важливим результатом роботи є визначення абсолютного виходу фотонів з поверхні досліджуваних зразків, які становлять відповідно для As_2S_3 $N_1 = 1,75 \cdot 10^{-3}$ фот./ел., $N_2 = 7,57 \cdot 10^{-4}$ фот./ел. і для багатошарових плівок $N_3 = 1,8 \cdot 10^{-3}$ фот./ел., $N_4 = 8,8 \cdot 10^{-4}$ фот./ел. та $N_5 = 1,3 \cdot 10^{-3}$ фот./ел.

Ключові слова: Електрон-фотонна спектроскопія, Фотон, Електрон, Бомбардування, Емісія.

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. R.D. Shull, *J. Nano. Struct. Mater.* **2**, 213 (1993).
2. H.H. Gleiter, *J. Nano. Struct. Mater.* **6**, 3 (1995).
3. М.І. Лінтур, Л.М. Маркович, В.О. Мастюгін, М.В. Приходько, І.С. Шароді, *Науковий вісник УжНУ*.
4. K. Adarsh, K. Sangunni, S. Kokenyesi, I. Ivan, M. Shipljak, *J. Appl. Phys.* **97**, 044314 (2005).