

04

Характеристики и параметры плазмы наносекундного разряда в воздухе между электродами из халькопирита

© А.К. Шуаибов, Г.Э. Ласлов, А.И. Миня, З.Т. Гомоки

Ужгородский национальный университет

E-mail: shuaibov@i.ua

Поступило в Редакцию 21 июня 2014 г.

Приведены характеристики и параметры плазмы наносекундного разряда в системе с резконеоднородным распределением напряженности электрического поля между электродами из CuInSe_2 в воздухе атмосферного давления. На основании исследования динамики излучения продуктов эрозии электродов из халькопирита определена зависимость электронной температуры от времени при межэлектродном расстоянии 2 мм.

Халькопириты типа $\text{CuInS}_2(\text{Se}_2)$, $\text{CuSbS}_2(\text{Se}_2)$ являются одними из наиболее перспективных материалов для использования в фотогальванических приборах (солнечных батареях), что обусловлено высоким коэффициентом поглощения в видимой и близкой ИК-области спектра, а также их высокой световой стойкостью [1]. Для практического использования этих материалов важным является получение качественных тонких пленок соответствующего стехиометрического состава или наноструктур на их основе.

В работах [2,3] методом эмиссионной спектроскопии с временным разрешением проведено измерение температуры и плотности электронов, скорости движения атомов индия и меди, а также скорости рекомбинации ионов металлов в лазерной эрозионной плазме на основе поликристаллической мишени из соединения CuInSe_2 в вакууме. Синтез наноструктур на основе соединения CuInSe_2 и исследование их основных характеристик проводились также в искровом и импульсном дуговом разрядах в этаноле, в котором находилась стехиометрическая смесь порошков меди, индия и селена [4]. О синтезе и исследовании характеристик наноструктур халькопиритов CuFS_2 в лазерном факеле и искровом разряде в дистиллированной воде сообщалось в работе [5], а получение аэрозольных наночастиц металла с размерами 8–75 nm в

потоке воздуха, который возбуждался в многоззорном газоразрядном генераторе, исследовано в работе [6].

В последнее время уделяется значительное внимание исследованию характеристик и физики процессов в разрядах наносекундной длительности с убегающими электронами, которые зажигались в системах электродов с неоднородным распределением напряженности электрического поля в азоте или воздухе атмосферного давления [7–9]. Во всех этих работах использовались простые металлические электроды, непригодные для синтеза наноструктур сложного состава из материалов типа халькопиритов.

В данной работе приводятся результаты исследования характеристик и параметров наносекундного разряда с убегающими электронами между электродами из халькопирита, который может использоваться для синтеза соответствующих наноструктур.

Цилиндрические и шероховатые электроды диаметром 6 mm из полукристаллического материала CuInSe_2 устанавливались в камере из нержавеющей стали, имели радиус закругления торцевых рабочих частей примерно 1–2 mm. Межелектродное расстояние — 2 mm. Давление воздуха в камере — 1 atm.

Разряд зажигался при помощи генератора биполярных импульсов высокого напряжения наносекундной длительности с резонансной перезарядкой накопительного импульсного конденсатора емкостью 1.54 nF и коммутатором — водородным тиратроном ТГИ-1-1000/25. Амплитуда импульса напряжения одной полярности на выходе модулятора могла меняться в диапазоне 10–25 kV при помощи импульсного кабельного трансформатора и имела длительность 20–30 ns. Частота следования импульсов могла меняться в пределах 40–1000 Hz, но в большинстве случаев она составляла 50–100 Hz.

Излучение анализировалось при помощи монохроматоров МДР-2 (200–650 nm) и ДФС-12 (360–650 nm). Осциллограммы интенсивности излучения спектральных линий лазерной плазмы исследовались с помощью электронного линейного умножителя ЭЛУ-14 ФС и осциллографа 6-ЛОР 04. Временное разрешение системы составляло примерно 2–3 ns. Осциллограммы представлены с учетом коэффициента спектральной чувствительности системы ЭЛУ-14 ФС+МДР-2. Более детально экспериментальная установка описана в работе [10].

Усредненные по времени спектры излучения разряда представлены в работах [10,11]. При анализе излучения с использованием монохроматора МДР-2 наиболее интенсивными были спектральные линии



Рис. 1. Фотография свечения плазмы наносекундного разряда в воздухе атмосферного давления между электродами из поликристаллического халькопирита — CuInSe_2 (размер свечения по вертикали примерно равен межэлектродному расстоянию — 2 mm).

продуктов эрозии халькопирита: 324.7, 327.4, 400.3, 407.3, 427.5, 464.3, 510.6, 515.3, 521.8, 570.0, 573.2 nm Cu I и 283.7, 293.3, 303.9, 325.6, 410.2, 451.1 nm In I. Спектральные линии атомов и ионов атомарного селена не обнаружены. При анализе же излучения плазмы в спектральном интервале 200–250 nm обнаружена группа интенсивных спектральных линий атомов и ионов меди, которая характерна для наносекундного разряда с медными электродами в воздухе атмосферного давления и представляет интерес для использования в миниатюрной лампе УФ-излучения малой длительности [12,13].

Фотография разряда (рис. 1) показывает, что он имеет объемный характер. Такой вид разряда в системе электродов „острие–острие“ при

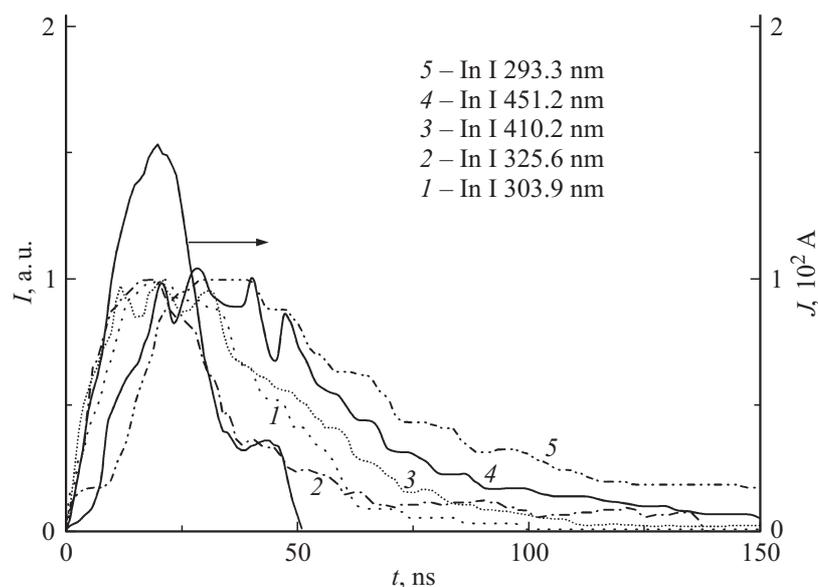


Рис. 2. Осциллограммы тока наносекундного разряда и излучения на переходах атома индия в наносекундном разряде с электродами из халькопирита — CuInSe_2 .

атмосферном давлении воздуха и без какой-либо отдельной системы предьонизации возможен только в случае предьонизации коротким импульсом убегающих электронов высокой энергии и сопутствующим рентгеновским излучением [14–16]. Однородность исследуемого разряда выше, чем для разрядов с убегающими электронами в системе металлических электродов [16,17], поскольку в последних наблюдается и яркое прикатодное свечение.

Из осциллограмм тока разряда и наиболее интенсивных спектральных линий атома индия следует, что линии в первые 50 ns коррелируются с импульсом тока (рис. 2). Но имеется при этом и интенсивное послесвечение, длительность которого для некоторых спектральных линий превышает 150 ns. Наибольшую длительность имело излучение на спектральных переходах атома индия с наименьшей энергией верхнего уровня, что может быть связано с рекомбинационным механизмом заселения последних на заднем фронте импульса тока.

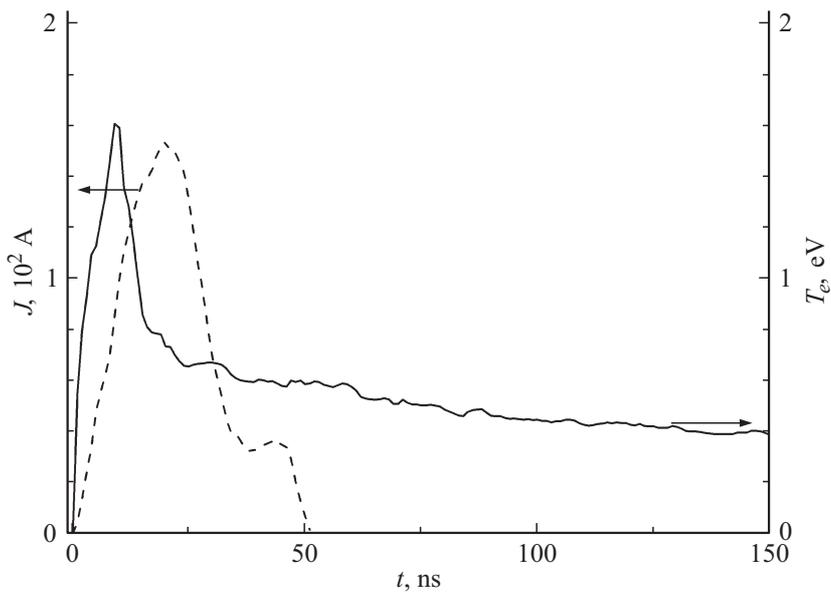


Рис. 3. Зависимость электронной температуры в плазме, определенной по осциллограммам излучения продуктов эрозии халькопирита, от времени и осциллограмма тока наносекундного разряда при $d = 2$ mm.

Поскольку время установления равновесного распределения в импульсных разрядах атмосферного давления не превышает 1 ps [17], что значительно меньше длительности импульсов тока, в этом случае возможно определение температуры электронов с использованием формулы [1,19]:

$$kT_e = \frac{E_2 - E_1}{\ln \left(\frac{I_1 A_2 g_2 \lambda_1}{I_2 A_1 g_1 \lambda_2} \right)}, \quad (1)$$

где k — постоянная Больцмана, E_1, E_2 — энергии уровней атома, I_1, I_2 и λ_1, λ_2 — интенсивности излучения спектральных линий и их длины волн излучения, A_1, A_2 и g_1, g_2 — вероятности спонтанных переходов и статвес энергетических уровней.

Базируясь на осциллограммах интенсивности спектральных линий, были рассчитаны временные зависимости заселенностей возбужденных

состояний атомов индия (с общим верхним энергетическим уровнем $6s^2S_{1/2}$, $E_{ex} = 3.022$ eV (спектральные линии 410.2 и 451.1 nm) и $7s^2S_{1/2}$, $E_{ex} = 4.50$ eV (293.3 nm) (рис. 3), где E_{ex} — энергия верхнего энергетического уровня). Определение временной зависимости температуры электронов осуществлялось посредством анализа распределения по энергиям для заселенностей возбужденных состояний атомов индия в определенные моменты времени.

Максимальная величина электронной температуры достигалась на переднем фронте импульса тока и составляла 1.6 eV. Полученная форма зависимости температуры электронов от времени и величина максимальной T_e в исследуемом разряде качественно коррелируются с соответствующей зависимостью $T_e(t)$, для разряда с пучком убегающих электронов в азоте атмосферного давления, которая определялась по соотношению интенсивностей полос молекулы азота 394.3 nm и молекулярного иона азота 391.4 nm [20].

Таким образом, показана возможность разработки точечной УФ-лампы с композитными электродами из халькопирита на основе группы спектральных линий атома меди в спектральном диапазоне 200–230 nm; максимальная температура электронов 1.6 eV достигается на переднем фронте импульса тока и уменьшается в послесвечении (при $t > 50$ ns) до 0.4–0.6 eV.

Это исследование выполнено при поддержке Европейского Союза и Венгрии и частично профинансировано Европейским социальным фондом ТÁМОР-4.2.4.A/2-11/1-2012/0001 „Национальная программа исследований“.

Список литературы

- [1] Шуайбов О.К., Опачко И.И., Качер И.Е., Чучман М.П. Лазерные источники излучения и их применение в микроэлектронике. Ужгород: Изд-во ГВУЗ „УжНУ“, 2009. 233 с.
- [2] Чучман М.П., Шуайбов А.К., Ласлов Г.Е. // Письма в ЖТФ. 2009. Т. 35. В. 6. С. 51–58. (Chuchman M.P., Shuaibov A.K., Laslov G.E. // Tech. Phys. Lett. 2009. V. 35. N 2. P. 764–767.)
- [3] Чучман М.П., Шуайбов А.К., Ласлов Г.Е., Шимон Л.Л. // ЖТФ. 2011. Т. 81. В. 1. С. 157–158. (Chuchman M.P., Shuaibov A.K., Laslov G.E., Shimon L.L. // Tech. Phys. 2011. V. 56. N 1. P. 152–153.)
- [4] Mardanian M., Nevar A.A., Nedeřko N., Tarasenko N.V. // Eur. Phys. J.D. 2013. V. 67. P. 208–213.

- [5] Невар Е.А., Савастенко Н.А., Брюзер В., Лопатик Д.А. и др. // ЖПС. 2010. Т. 71. № 1. С. 136–141.
- [6] Ефимов А.А., Иванов В.В., Багазеев А.В., Бекетов И.В. и др. // Письма в ЖТФ. 2013. Т. 39. В. 23. С. 51–57.
- [7] Levko D. // J. Appl. Phys. 2013. V. 114. P. 223 302(6).
- [8] Лепехин Н.М., Присеко Ю.С., Пуресев Н.И., Филиппов В.Г. // Письма в ЖТФ. 2014. Т. 40. В. 12. С. 51–58.
- [9] Орловский В.М., Панарин В.А., Шулепов М.А. // Письма в ЖТФ. 2014. Т. 40. В. 14. С. 86–94.
- [10] Ласлов Г.Е., Чучман М.П., Козак Я.Ю., Шуайбов О.К. // Науковий вісник Ужгородського університету. Серія Фізика. 2014. № 35. С. 143–145. (Laslov G.E., Chuchman M.P., Kozak Yu.Ya., Shuaibov A.K. // Uzhhorod Scientific Herald. Series Physics. 2014. Iss 35. P. 143–145.)
- [11] Laslov Geza, Shuaibov Alexander, Szegedi Sándor, László Elemér // J. Chem. Eng. 2014. V. 8. P. 302–305.
- [12] Бакит Е.Х., Тарасенко В.Ф., Шутько Ю.В., Ерофеев М.В. // Квантовая электроника. 2012. Т. 42. № 2. С. 153–156.
- [13] Шуайбов А.К., Ласлов Г.Е., Козак Я.Ю. // Опт. и спектр. 2014. Т. 116. № 3. С. 27–31. (Shuaibov A.K., Laslov G.E., Kozak Yu.Ya. // Opt. And Spectr. 2014. V. 116. P. 552–556.)
- [14] Тарасенко В.Ф. // Физика плазмы. 2011. Т. 37. № 5. С. 444–457.
- [15] Levko D, Tarasenko V.F., Krasik Ya.E. // J. Appl. Phys. 2012. V. 112. P. 073 304.
- [16] Бабич Л.П., Лойко Т.В. // Физика плазмы. 2010. Т. 36. № 2. С. 287–294. (Plasma Phys. Rep. 2010. V. 36. N 3. P. 263–270.)
- [17] Тарасенко В.Ф., Бакит Е.Х., Ломаев М.И., Рыбка Д.В., Сорокин Д.А. // ЖТФ. 2013. Т. 83. В. 8. С. 29–35.
- [18] Бабич Л.П., Лойко Т.В., Цукерман В.А. // УФН. 1990. Т. 160. В. 7. С. 49–81.
- [19] Методы исследования плазмы / Под ред. В. Лохте-Хольтгрена. М.: Мир, 1971. 552 с.
- [20] Сорокин Д.А., Ломаев М.И., Банюкина Т.И., Тарасенко В.Ф. // ЖТФ. 2014. Т. 84. В. 8. С. 13–20.