

04;07;12

Параметры многокомпонентной лазерной плазмы

© М.П. Чучман, А.К. Шуаибов, Г.Е. Ласлов, Л.Л. Шимон

Ужгородский национальный университет,
88000 Ужгород, Украина
e-mail: shuaibov@univ.uzhgorod.ua

(Поступило в Редакцию 25 мая 2010 г.)

Приведены результаты исследования параметров лазерной плазмы, которые получены в результате эмиссионной диагностики плазмы лазерного факела из поликристаллической мишени CuInSe_2 . Определены плотность и температура электронов в лазерном факеле сложного состава. Лазерная плазма формировалась в припороговом режиме абляции поликристаллической мишени, которая используется для получения тонких пленок на основе соединения CuInSe_2 .

Халькогенидные соединения типа CuIn(Sb)Se_2 , CuIn(Sb)S_2 в настоящее время применяются в эффективных и экономически выгодных солнечных батареях. Они характеризуются повышенным ресурсом работы по сравнению с фотоэлементами на основе кремния [1]. Эти соединения плавятся инконгруэнтно, что приводит к низкому воспроизводству свойств тонких пленок для методов термического напыления. При лазерном напылении существует возможность лучшего сохранения стехиометрии соответствующей халькогенидной мишени. При этом чем большее количество ионов попадает на подложку, тем эффективнее будет формирование кристаллической структуры тонкой пленки.

Для более глубокого понимания процессов в многокомпонентной лазерной плазме и оптимизации технологии лазерного напыления халькогенидов важным является знание ее эмиссионных характеристик и параметров (температуры T_e и плотности электронов N_e) [2]. В работе [3] приведены некоторые результаты эмиссионной диагностики лазерной плазмы, формирующейся из поликристаллической мишени на основе соединения CuInSe_2 .

На основании детального исследования спектральных и временных характеристик лазерной плазмы в настоящей работе проведено изучение температуры и плотности электронов в многокомпонентной плазме соединения CuInSe_2 .

Лазерная плазма формировалась в вакууме при фокусировке излучения лазера на длине волны $1.06 \mu\text{m}$ на поверхность поликристаллической мишени, изготовленной из соединения CuInSe_2 . Плотность мощности лазерного излучения на поверхности мишени составляла $5 \cdot 10^8 \text{ W/cm}^2$. Более детально условия эксперимента и методика определения параметров лазерной плазмы на основе ее излучательных характеристик приведены в работах [2,4,5].

Определение температуры электронов проводилось с использованием распределений заселенностей возбужденных состояний атомов меди и индия в области плазмы удаленной от мишени на расстояние $d = 0.8 \text{ cm}$, где $T_e = 0.8 \text{ eV}$, а при $d = 0.2 \text{ cm}$ $T_e = 0.7 \text{ eV}$ (рис. 1). Данные для построения распределения возбужденных

состояний частиц по энергиям приведены в таблице. Здесь λ — длина волны, I_2 — интенсивность спектральных линий на расстоянии 2 mm от мишени, I_8 — интенсивность спектральных линий на расстоянии 8 mm от мишени, g — статистический вес уровня, A — вероятность переходов, E — энергия уровня.

Увеличение температуры при распространении лазерной плазмы объясняется влиянием газодинамики расширения на ее параметры. Если на малых расстояниях плазма расширяется, то на больших она постепенно сжимается из-за того, что происходит накопление частиц вблизи фронта ударной волны, это приводит к уменьшению скорости ее движения. Поэтому основная масса материала будет со временем догонять фронт ударной

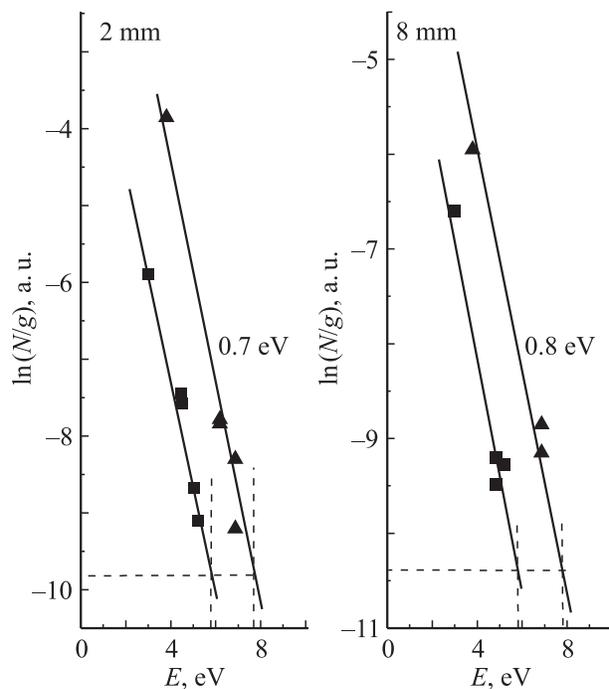


Рис. 1. Зависимость отношения заселенности энергетического уровня к его статистическому весу от энергии уровней атомов индия (■) и меди (▲) в лазерной плазме, формирующейся из поликристаллической мишени CuInSe_2 .

Данные, использованные для построения распределения возбужденных состояний частиц по энергиям

| λ , nm | Атом | I_2 , а. у. | I_8 , а. у. | g | A, s^{-1} | Терм | E , eV |
|----------------|------|---------------|---------------|-----|-------------|-----------------|----------|
| 324.80 | CuI | 0.81 | 0.98 | 4 | 1.37E8 | $4p^2P_{3/2}$ | 3.816 |
| 402.30 | CuI | 0.06 | 0.08 | 4 | 1.438E7 | $5d^2D_{3/2}$ | 6.868 |
| 406.30 | CuI | 0.05 | 0.12 | 6 | 2.099E7 | $5d^2D_{5/2}$ | 6.868 |
| 510.60 | CuI | 0.56 | 0.15 | 4 | 1.949E6 | $4p^2P_{3/2}$ | 3.816 |
| 515.30 | CuI | 0.58 | 0.25 | 4 | 1.034E8 | $4d^2D_{3/2}$ | 6.191 |
| 521.80 | CuI | 0.96 | 0.45 | 6 | 1.221E8 | $4d^2D_{5/2}$ | 6.192 |
| 252.20 | InI | 0.03 | 0.05 | 6 | 6.201E6 | $7d^2D_{5/2}$ | 5.190 |
| 256.00 | InI | 0.04 | 0.10 | 4 | 2.287E7 | $6d^2D_{3/2}$ | 4.841 |
| 260.20 | InI | 0.03 | — | 2 | 1.144E7 | $8s^2S_{1/2}$ | 5.038 |
| 271.00 | InI | 0.05 | 0.26 | 6 | 3.146E7 | $6d^2D_{3/2}$ | 4.848 |
| 275.30 | InI | 0.03 | 0.07 | 2 | 1.462E7 | $7s^2S_{1/2}$ | 4.501 |
| 277.50 | InI | 0.03 | — | 4 | 1.973E6 | $5p^2^4P_{3/2}$ | 4.466 |
| 293.30 | InI | 0.04 | 0.33 | 2 | 8.286E6 | $7s^2S_{1/2}$ | 4.501 |
| 410.20 | InI | 0.69 | 0.74 | 2 | 5.584E7 | $6s^2S_{1/2}$ | 3.022 |
| 451.10 | InI | 1.00 | 1.00 | 2 | 1.003E8 | $6s^2S_{3/2}$ | 3.022 |

волны, что и приводит к увеличению температуры электронов.

Также можно сказать, что концентрация атомов в основном состоянии различается намного больше, чем концентрация ионов в основном состоянии. Это можно проиллюстрировать путем сравнения величины населенности разных атомов на рис. 1 при энергии их ионизации. На начальных этапах существования плазма будет почти полностью состоять из однозарядных ионов. Такое утверждение полностью согласуется с видом распределения заселенностей возбужденных состояний атомов индия при времени 10 ns и расстоянии 2 mm от мишени, что иллюстрирует рис. 2. Из этого следует, даже несмотря на отсутствие данных для селена, что стехиометрия пленки должна в целом отвечать стехиометрии мишени.

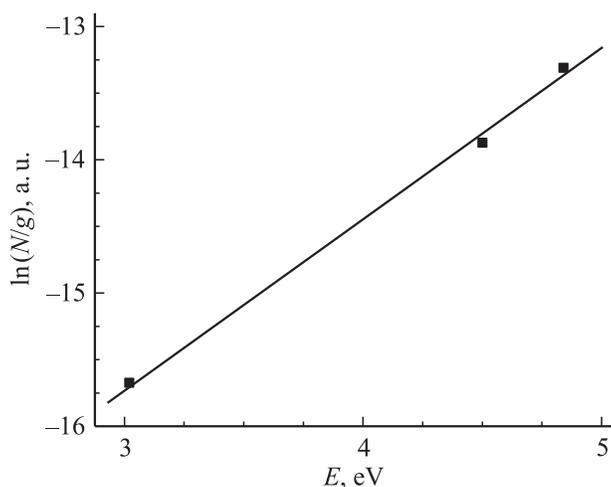


Рис. 2. Распределение заселенностей возбужденных состояний атомов индия (■), полученное на базе осциллограмм излучения при времени 10 ns и расстоянии 2 mm от мишени.

Динамика движения и специфика протекания рекомбинационных процессов при этом будет определять кинетические характеристики и ионизационное состояние плазмы, которая попадает на подложку. С помощью данных об энергодолансе плазмы на поздних стадиях разлета получим информацию о необходимости дополнительного термического влияния на подложку, где формируется пленка, если ее расстояние от мишени будет таким, что энергии, внесенной быстрыми и ионизированными частицами, будет недостаточно для формирования кристаллической структуры пленки, для которой показаны наилучшие значения фотоэлектрического преобразования.

Концентрация электронов в лазерной плазме соединения CuInSe₂ на расстоянии от мишени 0.2 cm составляла $2.8 \cdot 10^{16} \text{ cm}^{-3}$, т.е. больше, чем для T_e в лазерной плазме на основе соединения CuInS₂ ($N_e = 2.2 \cdot 10^{16} \text{ cm}^{-3}$, $d = 0.2 \text{ cm}$). Основной причиной этого различия являются разные энергии атомизации этих халькогенидов и меньшая энергия ионизации атомов селена, поскольку известно, что энергия разрыва связей с серой превышает энергию разрыва связей с селеном (это также отображается на величине запрещенной зоны соответствующих сульфидов и селенидов).

Таким образом, показано, что температура электронов многокомпонентной лазерной плазмы, на основании халькогенидной мишени мало изменяется с увеличением расстояния до мишени от 0.2 до 0.8 cm (увеличивается в диапазоне 0.7–0.8 eV). Увеличение температуры при распространении плазмы обусловлено влиянием газодинамики расширения на параметры плазмы. Плотность электронов на расстоянии 0.2 cm от мишени составляет $2.8 \cdot 10^{16} \text{ cm}^{-3}$. Исследование параметров и пространственных характеристик лазерной плазмы дает дополнительную информацию о ее энергодолансе и компонентном составе, что имеет важное значение при формировании тонких пленок в рабочих элементах фотоэлектрических преобразователей с необходимой структурой и стехиометрией.

Список литературы

- [1] Ahmed E., Hill A.E., Pilkington R.D., Leppaori J., Levoska J., Kusmartseva O. // J. Mater. Sci. 1997. Vol. 32. P. 5611–5613.
- [2] Шуайбов О.К., Опачко И.И., Качер И.Е., Чучман М.П. // Лазерні джерела випромінювання та їх застосування в мікроелектроніці. Ужгород. Видав. УжНУ „Говерла“. 2009. 233 с.
- [3] Чучман М.П., Шуайбов А.К., Ласлов Г.Е. // Письма в ЖТФ. 2009. Т. 35. Вып. 16. С. 51–58.
- [4] Chouchman M.P., Shuaibov A.K., Shimon L.L. // VI Int. Conf. Plasma Phys. And Plasma Technology. Minsk, Belarus: V.I. Stepanov Institute of Physics NASB. 2009. Vol. 1. P. 283–286.
- [5] Чучман М.П., Шуайбов А.К. // ЖПС. 2008. Т. 75. № 5. С. 217–229.