

- ченя // Механика машин, механизмов и материалов. – 2011. – № 2 (15). – С. 71-75.
3. Степаненко, Д.А. Измерение пространственного распределения механических напряжений в ультразвуковых волноводных системах

с помощью датчиков на основе эффекта Виллари / Д.А. Степаненко, К.А. Богданчук, В.Т. Минченя // Приборы и методы измерений. – 2013. – № 6. – С. 72-78.

УДК 621.382.002

ИОННО-ЛУЧЕВОЕ ФОРМИРОВАНИЕ ПОГЛОЩАЮЩИХ СЛОЕВ ТОНКОПЛЕНОЧНЫХ СОЛНЕЧНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ ИЗ CuInGaSe_2

Телеш Е.В., Черняк О.С., Достанко А.П.

Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники
Минск, Республика Беларусь

Солнечная энергетика наряду с другими видами возобновляемых источников энергии приобретает в мире все большую востребованность. При производстве солнечных элементов применяются различные технологии. При этом основные преимущества той или иной технологии, в основном, определяются двумя параметрами – эффективностью преобразования световой энергии в электрическую и себестоимостью производства. Лидером по эффективности среди тонкопленочных СЭ является технология CIGS (на основе соединения Cu(In,Ga)Se_x) [1]. Использование ионно-лучевого распыления является перспективным для формирования поглощающих слоев тонкопленочных солнечных элементов из CuInGaSe_2 . Это объясняется преимуществами ионно-лучевых систем: пространственное разделение областей генерации плазмы и области конденсации материала, более высокая чистота пленки из-за снижения степени рабочего вакуума, минимальное воздействие вторичных электронов на подложку [2].

К поглощающим слоям тонкопленочных солнечных элементов предъявляются следующие требования:

- толщина слоя: 1–2 мкм;
- тип проводимости слоя – акцепторный;
- поликристаллическая структура;
- размер зерна 1–1,5 мкм;
- высокое поглощение на длине $\lambda=1,5$ мкм;
- гомогенный состав с соотношением $\text{Me/Se}=1$.

Чтобы реализовать эти требования необходимо осуществить нанесение поглощающего слоя с высоким повторением стехиометрии состава монокристаллической мишени и получить необходимую структуру слоя.

Пленки CIGS наносили на модернизированной вакуумной установке Z-400 фирмы Leybold-Heraeus. Для формирования поглощающего слоя использовалась монокристаллическая синтезированная мишень из CuInGaSe_2 диаметром 22 мм. Объемные кристаллы соединения CuInGaSe_2 выращивали направленной кристаллизацией расплава в вертикальной однозонной

печи (вертикальный метод Бриджмена). Исходными веществами являлись медь, индий, галлий и селен чистотой > 99.999%. Рабочим газом служил аргон. Поглощающие слои толщиной 0,25–1,0 мкм наносились на подложки из стекла, стекла с тыльным контактом из молибдена и кварца при температуре 40 – 400 °С. В таблице 1 приведен состав пленок, полученный при разных температурах подложки.

Таблица 1 – Состав пленок CuInGaSe_2

№	T_n , °С	Cu, %	In, %	Ga, %	Se, %
1	270	16,63	25,23	5,96	52,19
2	50	18,68	22,18	6,75	52,39
3	300	19,07	23,72	6,99	50,22
4	400	21,30	27,68	7,02	44,00
5	300	20,47	24,96	7,43	47,14
6	150	18,61	24,46	7,32	49,61
7	50	18,91	23,20	6,48	51,40

При $T_n \geq 400^\circ\text{C}$ происходит потеря селена. На рисунке 1 приведены рентгенограммы пленок на стекле, полученных при разных температурах подложки. Установлено, что повышение температуры улучшает структуру пленок CuInGaSe_2 , что выражается в значительном увеличении интенсивности пиков (112) и (220).

Рамановская спектроскопия пленок показала, что покрытия обладают структурой халькопирита, о чем свидетельствует ярко выраженный пик на частоте 175 см^{-1} . Повышение температуры подложки приводит к формированию более выраженной структуры халькопирита (рисунок 2).

Удельное сопротивление неоднозначно зависело от температуры подложки и составило $(2,3 - 42,5) \cdot 10^{-3} \text{ Ом}\cdot\text{м}$ при 40°C , $0,44 \cdot 10^{-3} \text{ Ом}\cdot\text{м}$ при 270°C и $7,5 \cdot 10^{-3} \text{ Ом}\cdot\text{м}$ при 300°C . Стоит отметить, что тип проводимости у свеженанесенных образцов был электронного типа. Отжиг образцов осуществлялся при 550°C в течение 30–40 мин под пленкой Se толщиной 1,5–2,0 мкм. Отжиг способствовал появлению р-типа проводимости, как для стеклянных, так и для кварцевых подложек. Отжиг приводил к дальнейшему росту

зерна, а также к полной селенизации металлических компонентов полупроводника.

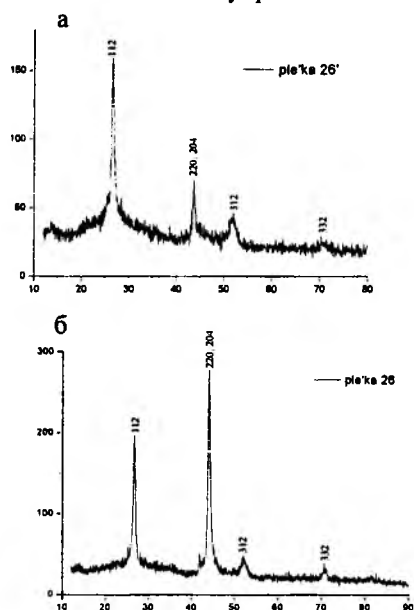


Рисунок 1 – Рентгенограммы пленок, полученных при 40° С (а) и 300° С (б)

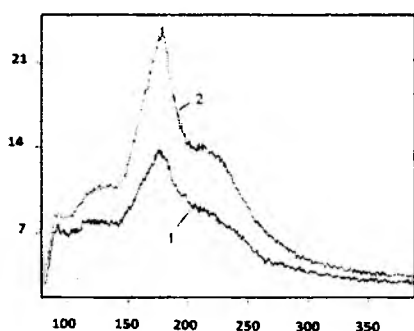


Рисунок 2 – Рамановские спектры пленок, полученных при температуре подложки 40° С (1) и 300° С (2)

Было также проведено исследование микроструктуры поглощающего слоя после проведения отжига. На рисунке 3 приведена микроструктура поперечного скола пленки CuInGaSe₂ после отжига при 550°С под пленкой селена. Наблюдается крупнокристаллическая структура покрытия со средним размером зерна около 1-1,2 мкм.

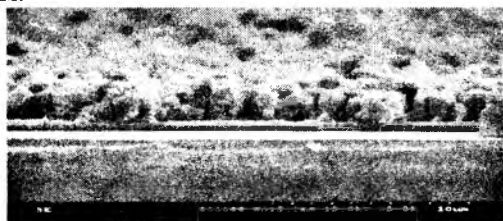


Рисунок 3 – Микроструктура пленки CuInGaSe₂ после отжига

На рисунке 4 приведена спектральная зависимость пропускания пленки CuInGaSe₂, нанесенной на стекло.

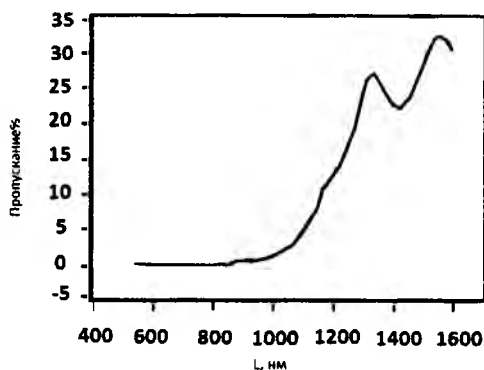


Рисунок 4– Спектральная зависимость пропускания пленки CuInGaSe₂

Из спектральной зависимости коэффициента поглощения была определена величина ширины запрещенной зоны E_g пленки, полученной при 300°С, которая составила 1,15 эВ, что близко к значению E_g объемного моно-кристаллического материала (рисунок 5).

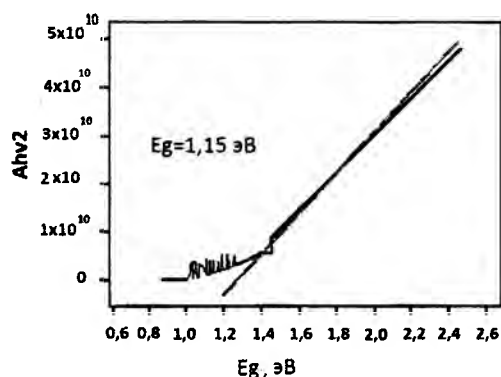


Рисунок 5 – Определение ширины запрещенной зоны пленки CuInGaSe₂

Таким образом, проведенные исследования показали, что ионно-лучевое распыление является перспективным методом для формирования поглощающих слоев из CuInGaSe₂.

- Zaretskaya, E.P. Characterization of Cu(In,Ga)Se₂ laser-deposited thin films: structural and photosensitive properties / E.P. Zaretskaya // Ternary and Multinary Compounds: scien. art. / Inst. Phys. Publ.; edited by R.D. Tomlinson. – London, –1998. –P. 361-364.
- Достанко, А.П. Использование конических ионных пучков в технологии тонких пленок / А.П.Достанко, В.Я.Ширипов // Элек-тронная обработка материалов.– 1982 .– № 2.– С. 38–41.