

Температурное поведение рекомбинационного излучения пленки $\text{Cu}(\text{In,Ga})(\text{S,Se})_2$ в составе солнечного элемента при лазерном возбуждении

И.Е. Свитенков¹, В.Н. Павловский¹, Е.В. Луценко¹, Г.П. Яблонский¹,
А.В. Мудрый², О.М. Бородавченко²

¹ Институт физики им. Б.И. Степанова НАН Беларуси, Минск,

² Научно-практический центр НАН Беларуси по материаловедению,
Минск

E-mail: v.pavlovskii@ifanbel.bas-net.by

Исследованы спектры излучения тонких поликристаллических пленок прямозонных твердых растворов $\text{Cu}(\text{In,Ga})(\text{S,Se})_2$ в структуре солнечных элементов при возбуждении непрерывным лазерным излучением с $\lambda = 532$ нм, а также излучением наносекундного импульсного ($\tau_{\text{имп}} = 15$ нс) лазера с $\lambda = 532$ нм в диапазоне интенсивностей возбуждения $0.5 \times 10^{-3} - 450$ кВт/см². Установлено, что при импульсном лазерном возбуждении в пленках возникает стимулированное излучение в спектральной области $h\nu = 1.07 - 1.09$ эВ, сохраняющееся в широком интервале температур от 10 К до 190 К, с минимальным уровнем пороговой накачки около 1 кВт/см² при $T = 10$ К.

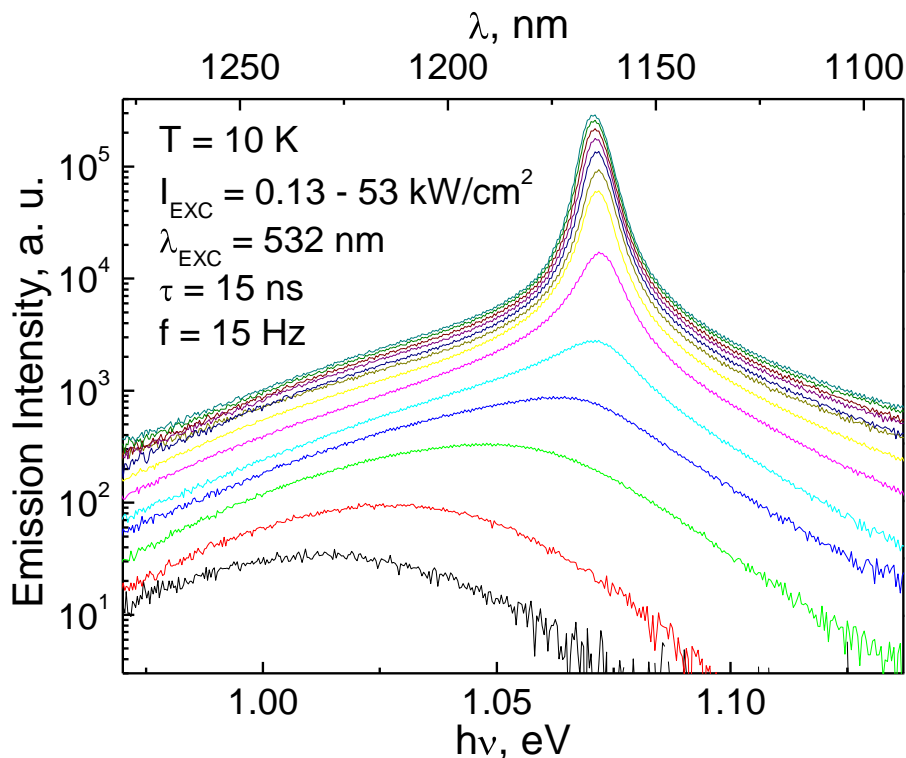


Рис. 1. Спектры излучения пленки $\text{Cu}(\text{In,Ga})(\text{S,Se})_2$ при различных интенсивностях возбуждения при $T = 10$ К

При повышении уровня возбуждения наблюдается высокоэнергетический сдвиг спектра излучения пленок $\text{Cu}(\text{In,Ga})(\text{S,Se})_2$, обусловленный заполнением энергетических состояний в хвостах зон, и проявляется стимулированное излучение (рис. 1) [1].

При низком уровне возбуждения $I_{\text{exc}}^{\text{CW}} = 0.5 \text{ Вт/см}^2$ непрерывным лазерным излучением повышение температуры приводит к высокоэнергетическому сдвигу спектра излучения пленок (рис. 2). Он сменяется низкоэнергетическим сдвигом при возбуждении импульсным лазерным излучением с интенсивностью $I_{\text{exc}}^{\text{P}} = 1.3 \text{ кВт/см}^2$ вблизи, но ниже порога стимулированного излучения, и затем опять становится высокоэнергетическим при возбуждении с интенсивностью $I_{\text{exc}}^{\text{P}} = 8 \text{ кВт/см}^2$ выше порога стимулированного излучения.

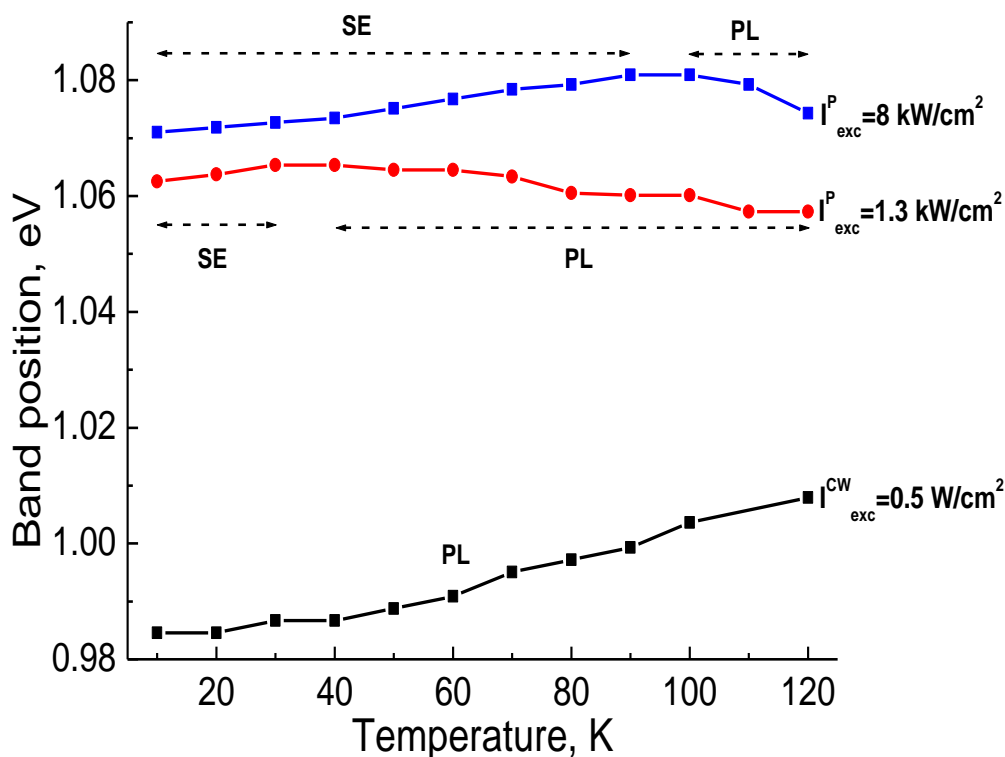


Рис. 2. Зависимость положения полосы излучения пленки $\text{Cu}(\text{In,Ga})(\text{S,Se})_2$ от температуры при различных интенсивностях возбуждающего лазерного излучения

Смена высокоэнергетического сдвига спектра излучения при непрерывном возбуждении низкоэнергетическим сдвигом при импульсном предпороговом возбуждении обусловлена сменой механизма излучательной рекомбинации при переходе от непрерывного к импульсному предпороговому возбуждению, т. е. переходу при повышении интенсивности возбуждающего излучения от рекомбинации через состояния

примесей и дефектов в хвостах плотности состояний пленки Cu(In,Ga)(S,Se)_2 при непрерывном лазерном возбуждении к межзонной излучательной рекомбинации при импульсном предпороговом лазерном возбуждении. При низком уровне возбуждения непрерывным лазерным излучением при повышении температуры происходит термическое перераспределение неравновесных носителей заряда между энергетическими уровнями в хвостах зон, вызывающее высокоэнергетическое смещение спектра излучения.

Наличие флуктуаций концентрации In и Ga, а также S и Se в пленке приводит к флуктуациям ширины запрещенной зоны всего соединения, т. е. наличию локальных потенциальных ям в разрешенных зонах [2]. Флуктуации электростатического потенциала, возникающие вследствие наличия значительной концентрации ионизованных примесей в частично компенсированном полупроводнике Cu(In,Ga)(S,Se)_2 p-типа, также создают потенциальные ямы в разрешенных зонах [3]. Межзонное стимулированное излучение создается рекомбинационными переходами носителей заряда из потенциальных ям в разрешенных зонах. При повышении температуры происходит термическое перераспределение неравновесных носителей заряда на более высокие уровни энергии в этих потенциальных ямах, что приводит к высокоэнергетическому смещению спектра стимулированного излучения.

При предпороговом импульсном возбуждении не происходит насыщение каналов рекомбинации в энергетическом интервале меньше энергии кванта стимулированного излучения. Термическая активация каналов безызлучательной рекомбинации при повышении температуры приводит к частичному и возрастающему с температурой опустошению уровней энергии в потенциальных ямах разрешенных зон. При этом происходит перераспределение неравновесных носителей заряда перед их излучательной рекомбинацией на более низкие уровни в потенциальных ямах разрешенных зон, что приводит к низкоэнергетическому смещению спектра спонтанного излучения.

1. *Svitsiankou E., Pavlovskii V.N., Lutsenko E.V., et al.* // J. Phys. D: Appl. Phys. 2016. V. 49, No. 9. P. 095106.
2. *Mattheis J., Rau U., Werner J.H.* // J. Appl. Phys. 2007. V. 101. P. 113519.
3. *Romero M. J., Du H., Teeter G., et al.* // Phys. Rev. 2011. V. B 84. P. 165324.