

ЗАВИСИМОСТЬ СПЕКТРАЛЬНЫХ И ЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК ИЗЛУЧЕНИЯ $\text{Fe}^{2+}:\text{ZnSe}$ -ЛАЗЕРА С НАКАЧКОЙ DF-ЛАЗЕРОМ ОТ ТЕМПЕРАТУРЫ АКТИВНОГО ЭЛЕМЕНТА

Е. В. Салтыков, А. А. Манешкин, Р. С. Чуваткин, С. В. Харитонов, В. С. Цыкин, А. В. Захряпа

ФГУП «РФЯЦ-ВНИИЭФ», г. Саров Нижегородской обл.

Исследованию различных кристаллов в качестве лазерных активных веществ, спектр излучения которых находится в диапазоне длин волн от 3 мкм до 5 мкм, уделяется большое внимание [1–10] в связи с нарастающей потребностью таких излучателей в технических и научно-исследовательских приложениях. Одной из перспективных лазерных сред для указанного спектрального диапазона являются кристаллы на основе соединения ZnSe , легированными ионами Fe^{2+} [1, 11].

Кристалл $\text{Fe}^{2+}:\text{ZnSe}$ имеет сильную зависимость времени жизни верхнего лазерного уровня иона Fe^{2+} от температуры [1, 7, 12–15]: ≈ 100 мкс при температуре жидкого азота и не более 360 нс при 292 К [7, 13, 15]. Для эффективной накачки данного кристалла необходимо подобрать лазерный источник, спектр излучения которого попадает в область наибольшего поглощения данного активного элемента. Таким образом, использование для накачки нецепного электро-разрядного DF-лазера с длительностью лазерного импульса ≈ 250 нс, спектр излучения которого полностью попадает в полосу поглощения кристалла $\text{Fe}^{2+}:\text{ZnSe}$, позволяет получать генерацию $\text{Fe}^{2+}:\text{ZnSe}$ -лазера в широком диапазоне температур. Применение DF-лазера для накачки так же дает возможность реализации импульсно-периодического режима работы.

Экспериментальная установка

Активный элемент (АЭ) (рис. 1) $\text{Fe}^{2+}:\text{ZnSe}$ -лазера был вырезан из монокристалла $\text{Fe}^{2+}:\text{ZnSe}$, выращенного из паровой фазы химическим транспортом в водороде на монокристаллической затравке [16–18]. Легирование ионами Fe^{2+} проводилось непосредственно в процессе роста. Концентрация ионов Fe^{2+} составила $0,8 \cdot 10^{18} \text{ см}^{-3}$.

На рис. 2 приведена схема экспериментальной установки по исследованию спектральных и энергетических характеристик $\text{Fe}^{2+}:\text{ZnSe}$ -лазера при накачке излучением DF-лазера. Лазер накачки работал как в моноимпульсном, так и в импульсно-периодическом режимах. Температура активного элемента варьировалась от -30 °С до $+80$ °С.

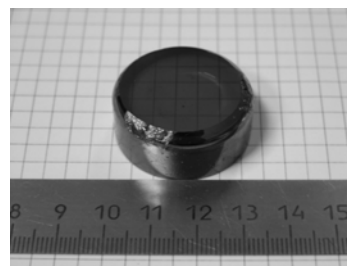


Рис. 1. Внешний вид АЭ - кристалла $\text{Fe}^{2+}:\text{ZnSe}$

АЭ 6, рис. 2, представлял собой цилиндр с диаметром 30,4 мм и длиной (длина усиления) 10,6 мм, торцы которого были отполированы и не имели просветляющего покрытия. АЭ закреплялся в медном хладопроводе, изменение температуры осуществлялось с помощью термоэлектрического модуля. Теплоотвод осуществлялся системой с жидкостным охлаждением Accelero Hybrid. Резонатор лазера $\text{Fe}^{2+}:\text{ZnSe}$ образован «глухим» плоским зеркалом 7 и плоским полупрозрачным выходным зеркалом 8. Коэффициент отражения выходного зеркала на длине волны генерации составлял 80 %, длина резонатора – 130 мм. $\text{Fe}^{2+}:\text{ZnSe}$ -лазер находился внутри камеры, внешний вид которой представлен на рис. 3, излучение накачки заводилось через окно 4. Окна камеры 4,5 выполнены из плоскопараллельных пластин CaF_2 без просветляющих покрытий. Для предотвращения появления конденсата на АЭ герметичная камера продувалась сухим техническим азотом до влажности ≈ 2 %.

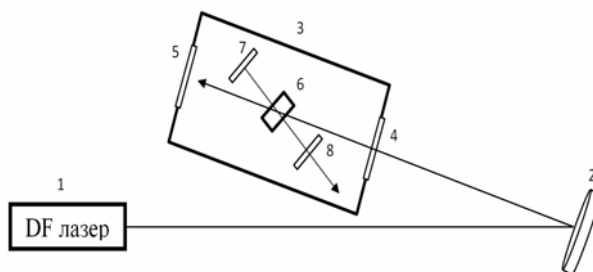


Рис. 2. Схема экспериментальной установки $\text{Fe}^{2+}:\text{ZnSe}$ -лазера: 1 – DF лазер, 2 – оптический растр, 3 – камера наполненная техническим азотом, 4 и 5 – окна камеры, 6 – кристалл $\text{Fe}^{2+}:\text{ZnSe}$, 7 и 8 – зеркала оптического резонатора

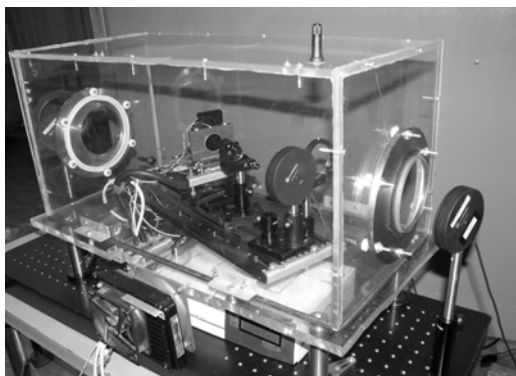


Рис. 3. Внешний вид камеры

Источником накачки служил импульсно-периодический электроразрядный DF-лазер. Длительность импульса составляла 250 нс. Пятно излучения накачки диаметром 10 мм формировалось на поверхности АЭ с помощью оптического раstra состоящего из зеркальных ячеек. Излучение накачки падало на АЭ под углом 20° к оптической оси резонатора. Спектр излучения DF-лазера полученный с помощью монохроматор-спектрографа MS5204i, состоял из нескольких линий, сосредоточенных

в диапазоне от 3,55 мкм до 4,1 мкм. Подробный спектр представлен на рис. 4.

Результаты экспериментов

На рис. 5 представлены спектры излучения генерации $\text{Fe}^{2+}:\text{ZnSe}$ -лазера при различной температуре АЭ.

При комнатной температуре ($+20^\circ\text{C}$) АЭ спектр излучения $\text{Fe}^{2+}:\text{ZnSe}$ -лазера лежит в диапазоне от 4,32 мкм до 4,62 мкм, при -30°C от 4,3 мкм до 4,55 мкм, при $+80^\circ\text{C}$ от 4,45 мкм до 4,66 мкм. Отмечено изменение спектрального состава излучения: наблюдаются смещение пика и изменение формы спектрального распределения при изменении температуры. При охлаждении АЭ происходит смещение спектра генерации в коротковолновую часть (при температуре АЭ $= -30^\circ\text{C}$ пик спектра генерации сместился на 45 нм), а при нагревании в длинноволновую часть спектра (при температуре АЭ $= +80^\circ\text{C}$ пик спектра генерации сместился на 35 нм). По всей видимости, это происходит из-за изменения сечения усиления АЭ [14]. Ширина спектра по уровню 0,1 уменьшается как при нагревании, так и при охлаждении АЭ и составляет: при -30°C $\Delta\lambda = 180$, при $+20^\circ\text{C}$ $\Delta\lambda = 215$, при $+80^\circ\text{C}$ $\Delta\lambda = 180$.

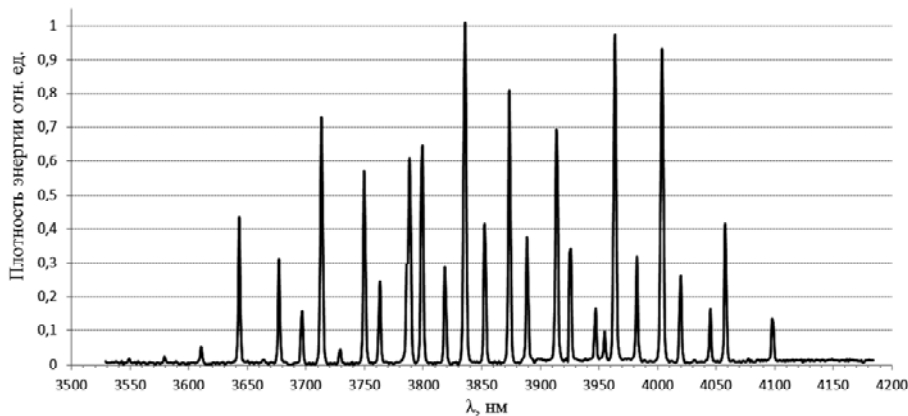


Рис. 4. Спектр излучения DF-лазера

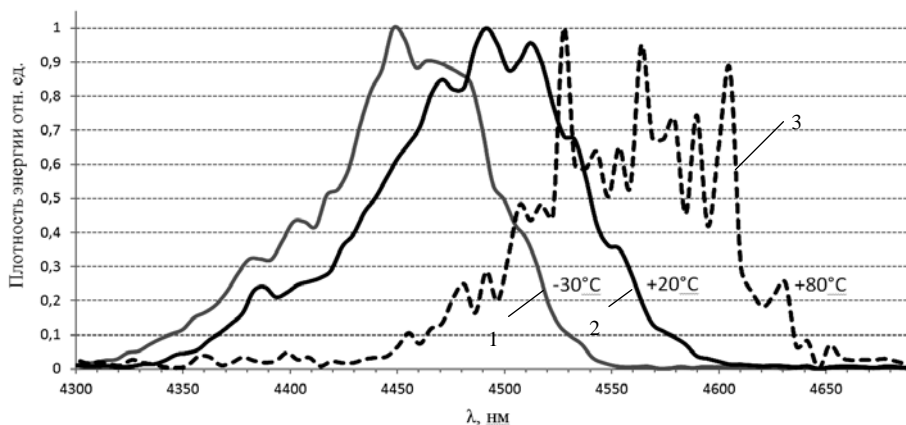


Рис. 5. Спектр излучения $\text{Fe}^{2+}:\text{ZnSe}$ -лазера при различной температуре АЭ: кривая 1 – при температуре АЭ -30°C , кривая 2 – при температуре АЭ $+20^\circ\text{C}$, кривая 3 – при температуре АЭ $+80^\circ\text{C}$

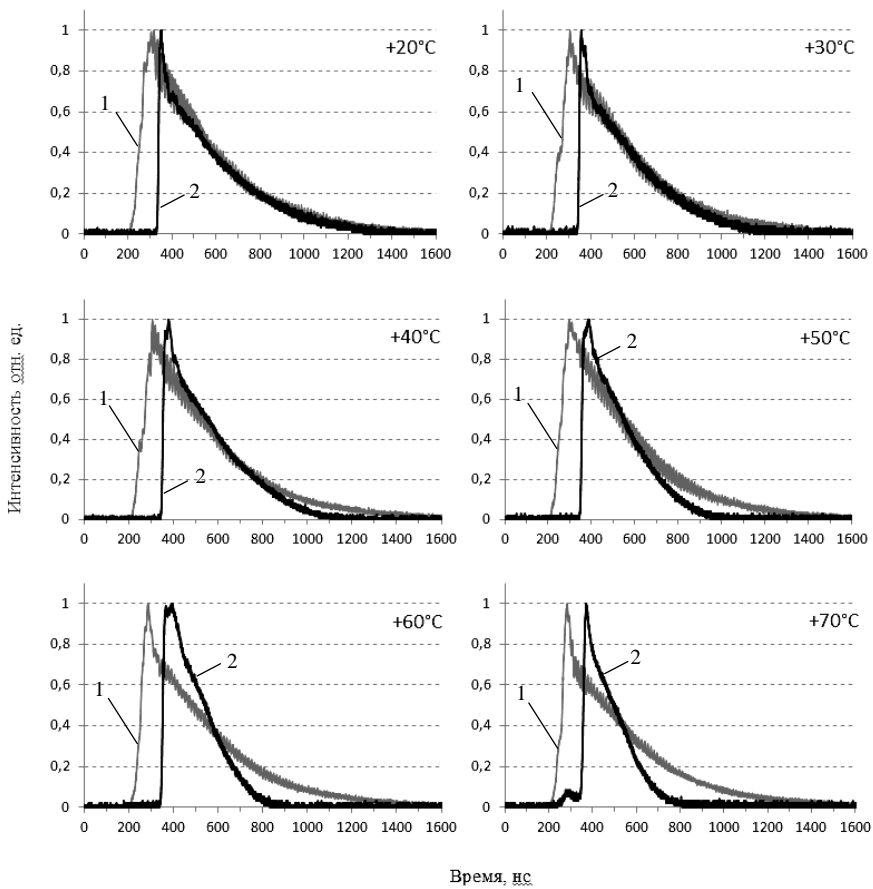


Рис. 6. Осциллограммы: 1 – импульса излучения DF-лазера; 2 – импульса Fe²⁺:ZnSe-лазера при различной температуре АЭ

Получены формы импульсов накачки и генерации при различных температурах АЭ, результаты представлены на рис. 6.

Как видно из осциллограмм, при температурах АЭ +20 и +30 °С импульс генерации Fe²⁺:ZnSe лазера после начального резко выраженного пика повторяет форму импульса накачки. Однако при дальнейшем нагревании АЭ длительность импульса генерации по основанию уменьшается, из-за уменьшения коэффициента усиления АЭ. Длительность импульса накачки и генерации на полувысоте составляет от 200 нс

до 280 нс и от 140 нс до 200 нс, соответственно. Видно, что импульс генерации задержан относительно импульса накачки на 120нс.

На рис. 7 представлено изменение КПД Fe²⁺:ZnSe-лазера по поглощенной энергии накачки в зависимости от температуры АЭ. Наблюдается увеличение КПД при охлаждении АЭ, и уменьшение КПД при нагреве АЭ. Причина данного изменения сильная зависимость времени жизни верхнего лазерного уровня иона Fe²⁺ от температуры [1, 7, 12–15].

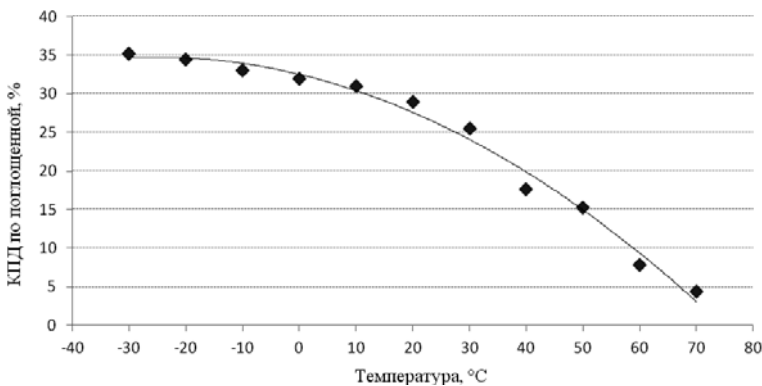


Рис. 7. Изменение КПД Fe²⁺:ZnSe-лазера по поглощенной энергии накачки в зависимости от температуры АЭ

Реализована работа $\text{Fe}^{2+}:\text{ZnSe}$ -лазера с частотой следования импульсов 10 Гц в течение 5 секунд благодаря импульсно-периодическому режиму работы лазера накачки. На рис. 8 показана работа $\text{Fe}^{2+}:\text{ZnSe}$ -лазера в импульсно-периодическом режиме. Видна высокая стабильность КПД $\text{Fe}^{2+}:\text{ZnSe}$ -лазера по поглощенной энергии накачки, наблюдается небольшое изменение энергии генерации, это связано с нестабильностью энергии DF-лазера от импульса к импульсу. Средняя мощность $\text{Fe}^{2+}:\text{ZnSe}$ -лазера при температуре АЭ -30°C больше на 36 %, чем при температуре АЭ $+20^\circ\text{C}$.

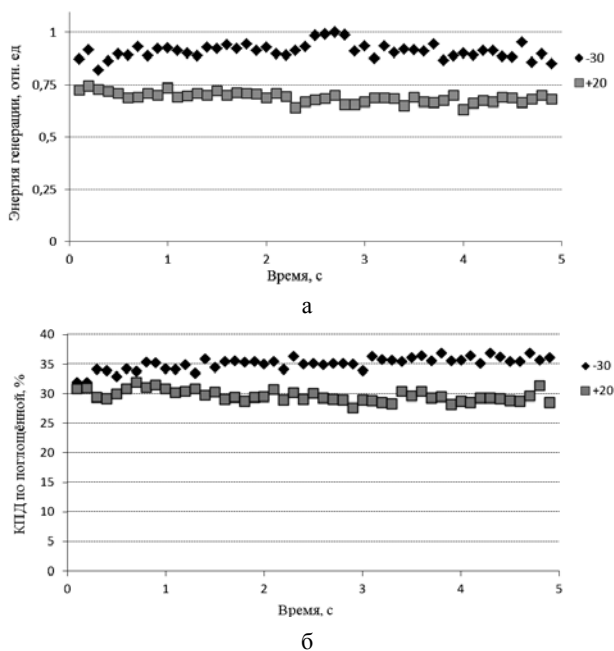


Рис. 8. Энергия генерации (а) и КПД $\text{Fe}^{2+}:\text{ZnSe}$ -лазера по поглощенной энергии накачки (б) в импульсно-периодическом режиме с частотой следования импульсов 10 Гц. Черные точки при температуре АЭ -30°C , серые точки при температуре АЭ $+20^\circ\text{C}$

Заключение

В работе реализован импульсно-периодический режим работы $\text{Fe}^{2+}:\text{ZnSe}$ -лазера при накачке электро-разрядным DF-лазером.

Получены спектры излучения генерации $\text{Fe}^{2+}:\text{ZnSe}$ -лазера при различной температуре АЭ. При охлаждении АЭ происходит смещение длины волны генерации в коротковолновую часть спектра, а при нагревании в длинноволновую часть спектра.

Получены формы и длительности лазерных импульсов DF-лазера и $\text{Fe}^{2+}:\text{ZnSe}$ -лазера при различной температуре АЭ. При нагревании АЭ длительность импульса генерации по основанию уменьшается.

Получена зависимость КПД $\text{Fe}^{2+}:\text{ZnSe}$ -лазера по поглощенной энергии накачки от температуры АЭ. Наблюдается увеличение КПД при охлаждении АЭ, и уменьшение КПД при нагреве АЭ. Максимальный КПД по поглощенной энергии накачки составил 35,2 %.

Реализована стабильная работа $\text{Fe}^{2+}:\text{ZnSe}$ -лазера с частотой следования импульсов 10 Гц в течение 5 секунд. Средняя мощность $\text{Fe}^{2+}:\text{ZnSe}$ -лазера при температуре АЭ -30°C больше на 36 %, чем при температуре АЭ $+20^\circ\text{C}$.

Литература

1. Adams J. J., Bibeau C., Page R. H., Krol D. M., Furu L. H., Payne S. A. 4,0–4,5 μm lasing of $\text{Fe}:\text{ZnSe}$ below 180K, a new mid-infrared laser material, *Optics Letters*, 24 (1999) 1720–1722.
2. Акимов В. А., Воронов А. А., Козловский В. И., Коростелин Ю. В., Ландман А. И., Подмарьков Ю. П., Фролов М. П. Эффективный ИК лазер на кристалле $\text{ZnSe}:\text{Fe}$ с плавной перестройкой в спектральном диапазоне 3,77–4,40 мкм, *Квантовая электроника*, 34 (2004) 912–914.
3. Kernal J., Fedorov V. V., Gallian A., Mirov S. B., Badikov V. V. 3,9–4,8 μm gain-switched lasing of $\text{Fe}:\text{ZnSe}$ at room temperature, *Optics Express*, 13 (2005) 10608–10615.
4. Akimov V. A., Frolov M. P., Korostelin Y. V., Kozlovsky V. I., Landman A. I., Podmar'kov Y. P., Voronov A. A. Room-temperature operation of a $\text{Fe}^{2+}:\text{ZnSe}$ laser, *Proceedings of SPIE*, 6610 (2007) 661009-1-6.
5. Mirov S. B., Fedorov V. V., Moskalev I. S., Martyshkin D. V. Recent Progress in Transition-Metal-Doped II–VI Mid-IR Lasers [Invited Paper], *IEEE Journal of quantum electronics*, 13 (2007) 810-822.
6. Jelínková H., Koranda P., Doroshenko M. E., Šulc J., Jelínek M., Cech M., Basiev T. T., Badikov V. V., Badikov D. V. Room-temperature lasing, gain-switched bulk, tunable $\text{Fe}:\text{ZnSe}$ laser, 7721 (2010) 772111-772116.
7. Mirov S., Fedorov V., Moskalev I., Martyshkin D., Kim C. Progress in Cr^{2+} and Fe^{2+} doped mid-IR laser materials, *Laser & Photonics Reviews*, 4 (2010) 21-41.
8. Mirov S. B., Fedorov V. V., Martyshkin D., Moskalev I. S., Mirov M. Progress in Mid-IR Lasers Based on Cr and Fe-Doped II–VI Chalcogenides, *IEEE Journal of selected topics in quantum electronics*, 21 (2015) 1601719.
9. Mirov S. B., Fedorov V. V., Martyshkin D. V., Moskalev I. S., Mirov M. S., Gafarov O., Martinez A., Peppers J., Smolski V., Vasilyev S., Gapontsev V. Mid-IR Gain Media Based on Transition Metal Doped II-VI Chalcogenides, *Proceedings of SPIE*, 9744 (2016) 97440A-1-8.
10. Mirov S., Fedorov V., Martyshkin D., Moskalev I., Mirov M., Vasilyev S. High Average Power $\text{Fe}:\text{ZnSe}$ and $\text{Cr}:\text{ZnSe}$ Mid-IR Solid State Lasers, *Optical Society of America*, (2015).
11. Великанов С. Д., Зарецкий Н. А., Зотов Е. А., Казанцев С. Ю., Кононов И. Г., Коростелин Ю. В., Манешкин А. А., Фирсов К. Н., Фролов М. П., Юткин И. М. Лазер на $\text{ZnSe}:\text{Fe}^{2+}$ с энергией излучения 1,2 Дж при комнатной температуре, *Квантовая электроника*, (2015).

12. Fedorov V. V., Mirov S. B., Gallian A., Badikov D. V., Frolov M. P., Korostelin Y. V., Kozlovsky V. I., Landman A. I., Podmar'kov Y. P., Akimov V. A., Voronov A. A. 3,77–5,05- μm Tunable Solid-State Lasers Based on Fe^{2+} -Doped ZnSe Crystals Operating at Low and Room Temperatures, *IEEE Journal of quantum electronics*, 42 (2006) 907-917.

13. Myoung N., Fedorov V. V., Mirov S. B., Wenger L. E. Temperature and concentration quenching of mid-IR photoluminescence in iron doped ZnSe and ZnS laser crystals, *Journal of Luminescence*, 132 (2012) 600–606.

14. Adams J. J. New Crystalline Materials for Nonlinear Frequency Conversion, Electro-Optic Modulation, and Mid-Infrared Gain Media, in, (2002).

15. Frolov M. P., Korostelin Y. V., Kozlovsky V. I., Mislavskii V. V., Podmar'kov Y. P., Savinova S. A., Skasyrsky Y. K. Study of a 2-J pulsed Fe:ZnSe 4- μm laser, *Laser Physics Letters*, 10 (2013).

16. Kozlovsky V. I., Akimov V. A., Frolov M. P., Korostelin Y. V., Landman A. I., Martovitsky V. P., Mislavskii V. V., Podmar'kov Y. P., Skasyrsky Y. K., Voronov A. A. Room-temperature tunable mid-infrared lasers on transition-metal doped II–VI compound crystals grown from vapor phase, *Physica Status Solidi B*, 247 (2010) 1553–1556.

17. Ландман А. И. Парофазный рост монокристаллов соединений $\text{A}^{\text{II}}\text{B}^{\text{VI}}$, легированных переходными металлами, для лазеров среднего ИК-диапазона, Диссертация на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук, Физический институт им. П. Н. Лебедева РАН, Москва, Долгопрудный, (2009), с. 151.

18. Akimov V. A., Frolov M. P., Korostelin Y. V., Kozlovsky V. I., Landman A. I., Podmar'kov Y. P., Voronov A. A. Vapour growth of II-VI single crystals doped by transition metals for mid-infrared lasers, *Phys. Stat. Sol.*, 3 (2006) 1213–1216.