

Fe²⁺:ZnSe – НОВЫЙ МАТЕРИАЛ ДЛЯ ПАССИВНЫХ ЗАТВОРОВ ЛАЗЕРОВ С ДЛИНОЙ ВОЛНЫ ИЗЛУЧЕНИЯ 3 МКМ

Кулешов Н.В., Щербицкий В.Г., Кисель В.Э.

Международный лазерный центр БНТУ, Беларусь, 220013, г.Минск, пр-т Ф.Скорины, 65

Левченко В.И., Постнова Л.И.

Институт физики твердого тела и полупроводников НАН Беларуси, 220072, г.Минск, ул.П.Бровки, 17

С момента открытия в 1996 году нового класса лазерных материалов среднего ИК-диапазона на основе легированных переходными металлами полупроводниковых соединений A²B⁶ [1-2] сформировались два относительно независимых направления их практического применения: генерирующие среды и насыщающиеся поглотители (пассивные затворы). В настоящее время оба эти направления активно и успешно развиваются. В частности, на Cr²⁺:ZnSe созданы эффективные пассивные затворы для безопасных для глаз лазеров на основе легированного эрбием стекла, генерирующих на длине волны 1,54 мкм, позволяющие формировать импульсы оптического излучения длительностью 40 нс и энергией до 5 мДж и обеспечивающие интенсивность насыщения около 70 кВт/см² и лучевую прочность 2 Дж/см² [3]. На этом же материале реализованы пассивные затворы для лазеров с длиной волны излучения около 1,9 мкм (Yb,Tm,:KYW), имеющие интенсивность насыщения и лучевую прочность около 35 кВт/см² и 2 Дж/см², соответственно [4]. Для лазеров с длиной волны излучения 2 мкм созданы также затворы на Cr²⁺:CdMnTe, позволяющие формировать импульсы длительностью 200 нс с энергией до 8 мДж [5]. Вместе с тем, до последнего времени отсутствовали эффективные пассивные затворы для излучающего в области 3 мкм эрбиевого лазера, перспективного для медицинских применений. Эти лазеры в настоящее время перспективны для применения в хирургии, офтальмологии, стоматологии и других областях медицины в связи с высоким коэффициентом поглощения воды биологических тканей в этом спектральном диапазоне [6]. Для указанных практических приложений требуются, как правило, короткие импульсы с высокой пиковой мощностью. В настоящее время модуляция добротности 3 мкм-лазеров осуществляют при помощи сложных и громоздких активных затворов [7-8] и дорогих полупроводниковых эпитаксиальных структур либо неудобных в эксплуатации органических поглотителей.

Целью настоящей работы была разработка технологии получения материала и создание эффективного пассивного затвора для лазеров с длиной волны излучения 3 мкм на основе объемных кристаллов легированного железом селенида цинка.

Кристаллы легированного железом селенида цинка для лазерных экспериментов были получены двухстадийным методом диффузионного легирования, обеспечивающим высокое качество, воспроизводимость и возможность регулирования в широких пределах оптических параметров конечного продукта. На первой стадии вертикальным методом движущегося нагревателя [9] выращивались нелегированные кристаллы с малыми оптическими потерями в диапазоне длин волн 500-3000 нм. Высокое оптическое качество получаемого при этом материала обеспечивалось использованием исходных элементарных компонент высокой чистоты (Zn(6N), Se(5N6)), минимальным внесением загрязнений на стадии синтеза, вследствие применения метода парофазного взаимодействия исходных элементов при относительно низкой температуре (800°C), удалением избытка компонент синтезированного соединения в процессе перегонки в условиях динамического вакуума, прецизионным регулированием стехиометрии поликристаллического ZnSe отжигом под контролируемым

давлением пара цинка, выращиванием монокристаллов в близких к равновесным условиям (переохлаждение $< 5^{\circ}\text{C}$, скорость протяжки < 2 мм/сутки) и тщательным контролем технологического процесса и конечного продукта. При этом критерием пригодности кристаллов для диффузионного легирования были: плотность ямок травления на плоскости (110) $< 5 \times 10^4 \text{ см}^{-2}$ и оптические потери в диапазоне 1200-3000 нм $< 0,05 \text{ см}^{-1}$.

На второй стадии технологического процесса осуществлялось легирование кристаллов ZnSe железом методом термической диффузии из твердофазного металлического источника. Преимуществами этого метода легирования являются минимальные вносимые оптические потери и возможность точного регулирования уровня и профиля легирования путем изменения толщины металлической пленки, температуры и времени легирования. Пленки железа осаждались на обе стороны плоскопараллельных пластин ZnSe методом магнетронного распыления. В качестве мишени одноразового использования при этом применялись металлические диски, вырезанные из листа трансформаторной стали толщиной 0,5 мм. В качестве рабочего газа использовался аргон чистотой 99,9%. Напыление производилось при давлении аргона, напряжении и токе разряда $3,6 \times 10^{-3}$ Тор, 450 В и 0,6 А, соответственно. При этом толщина пленки в диапазоне 0,05-0,15 мкм регулировалась путем изменения времени напыления. Процесс диффузии проводился в откачанной до остаточного давления менее 1×10^{-5} Тор и запаянной кварцевой ампуле. Температура и время диффузии в зависимости от толщины образца и требуемой концентрации примеси изменялись в диапазонах 1000-1100 $^{\circ}\text{C}$ и 2-6 суток, соответственно.

Легирование ZnSe железом, как видно из Рисунка 2, приводит к появлению в спектре коэффициента поглощения одной широкой полосы с максимумом около 3000 нм, обусловленной электронно-колебательными переходами $^5\text{E} - ^5\text{T}_2$ ионов Fe^{2+} (электронная конфигурация 3d^6) замещающих катионы тетраэдрически координированных ионов Zn^{2+} селенида цинка [10] и небольшому сдвигу в длинноволновую сторону края фундаментального поглощения. При этом визуальная прозрачность кристалла сохраняется (Рис.1), лишь немного изменяется цвет: от желтого к желто-зеленому, с преобладанием желтого. Одновременно заметно возрастают оптические потери в диапазоне длин волн 500-6000 нм.

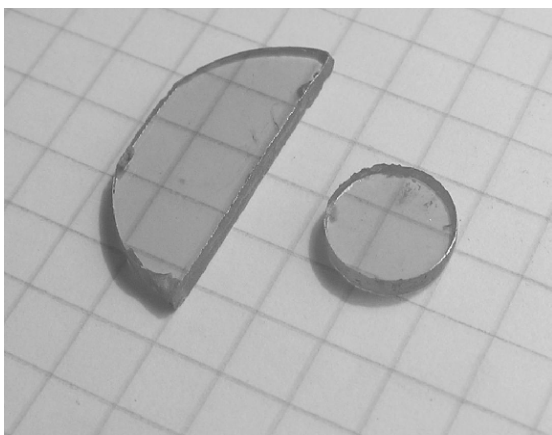


Рис.1. Внешний вид пластин легированного железом селенида цинка.

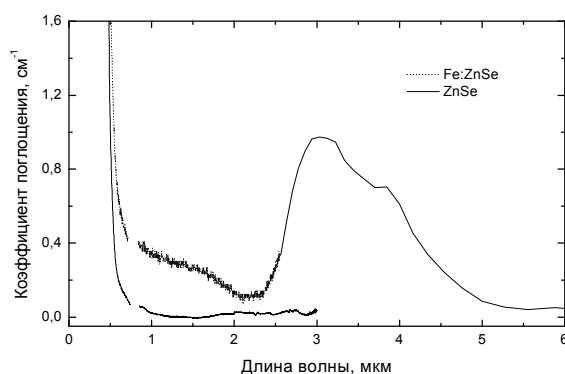


Рис.2. Спектры коэффициента поглощения нелегированного и легированного железом кристаллов селенида цинка

Экспериментально исследован процесс насыщения поглощения лазерного излучения с длиной волны 2.79 мкм в кристаллах $\text{Fe}^{2+}:\text{ZnSe}$. При этом, в качестве источника излучения использовался лазер с импульсной ламповой накачкой и пассивной модуляцией добротности на кристалле иттрий-скандий-гадолиниевого граната с эрбием (Cr,Er:YSGG), генерирующий световые импульсы с частотой повторения 0,5 Гц, длительностью 170 нс и энергией 60 мДж. В ходе измерений экспериментально регистрировалась зависимость пропускания T образца от средней поверхностной плотности энергии, определяемой как частное от деления экспериментально измеренных энергии падающего излучения и площади лазерного пятна. Непосредственно измеренные значения пропускания затем корректировались на френелевские потери, обусловленные отражением от граней образца. Полученная таким образом экспериментальная зависимость приведена на рисунке 3. Как видно, при увеличении поверхностной плотности энергии наблюдается эффективное просветление, т.е. увеличение пропускания до 95%. Лучевая стойкость образцов $\text{Fe}:\text{ZnSe}$ была оценена на уровне 1.5 Дж/см^2 .

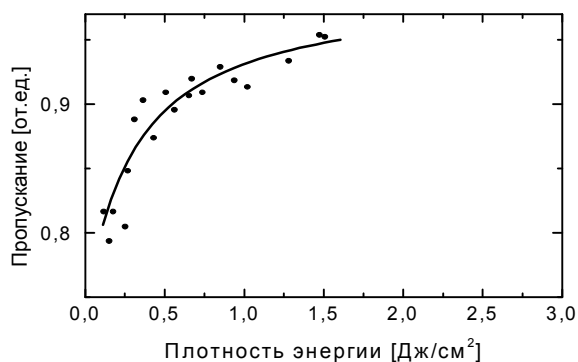


Рис.3 Зависимость пропускания кристалла, $\text{Fe}:\text{ZnSe}$ от средней поверхностной плотности энергии лазерного импульса. Точки - экспериментальные данные, сплошная линия – модельные расчеты.

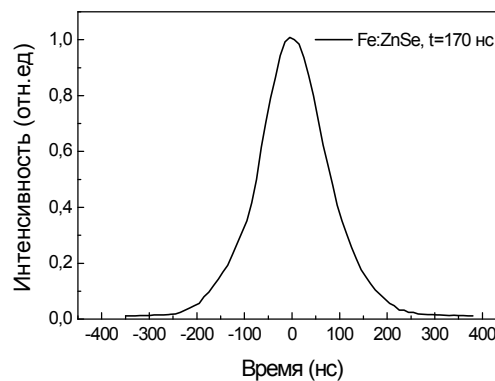


Рис.4. Временной профиль импульса Cr,Er:YSGG -лазера с пассивным модулятором добротности на основе $\text{Fe}:\text{ZnSe}$.

Для описания экспериментальных результатов использовалась теоретическая модель, учитывающая поглощение из возбужденного состояния, а также временной и пространственный профили падающего на поглотитель импульса [11]. Из наилучшего совпадения экспериментальных и расчетных данных были определены поперечные сечения поглощения из основного σ_{GSA} и возбужденного σ_{ESA} состояний на длине волны 2.79 мкм, которые составили 5.0×10^{-19} и $0 \times 10^{-19} \text{ см}^2$, соответственно.

Экспериментальная апробация разработанных насыщающихся поглотителей была проведена в лазере на кристалле Cr,Er:YSGG с импульсной ламповой накачкой, излучающем на длине волны 2.79 мкм. Резонатор лазера был образован плоским высокоотражающим зеркалом и плоским выходным зеркалом с пропусканием на длине волны генерации 35 %. Длина резонатора составляла около 370 мм. В качестве активной среды использовался стержень диаметром 5 мм и длиной 75 мм. Образцы пассивных затворов без антиотражающих покрытий помещались в резонатор на расстоянии 4-6 мм от

выходного зеркала. Параметр внутрирезонаторной фокусировки излучения (отношение поперечных сечений моды резонатора на активном элементе и просветляющейся среде) составлял 1.6. Это было обусловлено влиянием термической линзы, индуцируемой в активном элементе. Энергия импульсов свободной генерации составляла около 150 мДж при электрической энергии импульсов накачки 64 Дж, следующих с частотой 0.5 Гц. Длительность импульса варьировалась от 250 до 300 мкс. Лучшие выходные характеристики Cr,Er:YSGG лазера в режиме пассивной модуляции добротности были достигнуты на кристаллах Fe:ZnSe с начальным пропусканием 78 %. При максимальной энергии накачки (64 Дж) были получены моноимпульсы длительностью 170 нс с энергией 60 мДж (Рис. 4).

Таким образом, в результате проведенных исследований разработана технология получения и получены экспериментальные образцы кристаллов легированного железом селенида цинка с оптическими потерями в диапазоне длин волн 2000-6000 нм до $0,1 \text{ см}^{-1}$. Экспериментально определены значения поперечных сечений поглощения из основного и возбужденного состояний иона Fe^{2+} в кристалле ZnSe ($\sigma_{GSA}=5.0 \times 10^{-19} \text{ см}^2$, $\sigma_{ESA}=0 \times 10^{-19} \text{ см}^2$) на длине волны 2.79 мкм. При использовании Fe^{2+} :ZnSe в качестве пассивного затвора впервые получен режим модуляции добротности Cr,Er:YSGG-лазера, излучающего на длине волны 2.79 мкм. В режиме пассивной модуляции добротности получены моноимпульсы с энергией 60 мДж и длительностью 170 нс.

Полученные результаты свидетельствуют о перспективности использования кристаллов Fe:ZnSe в качестве насыщающихся поглотителей для лазеров излучающих в области 3 мкм.

Список литературы

1. L.D. DeLoach, R.H. Page, G.D. Wilke, S.A. Payne, W.F. Krupke. IEEE J. of Quantum Electronics **32**, 6, 885 (1996).
2. L.D. DeLoach, R.H. Page, G.D. Wilke, S.A. Payne, W.F. Krupke. IEEE Journal of Quantum Electronics. **32**, 6, 885 (1998).
3. A.V. Podlipensky, V.G. Shcherbitsky, N.V. Kuleshov, V.P. Mikhailov, V.I. Levchenko, V.N. Yakimovich. Optics Letters **24**, 14, 960 (1999).
4. A.N. Kuzmin, N.K. Nikeenko, A.A. Demidovich, A.N. Titov, M. Mond, S. Kueck, V.E. Kisel, N.V. Kuleshov. Abstract ASSL-2002, Quebec, Canada, Febr. 3-6, 2002, p. PD7
5. A.V. Podlipensky, V.G. Shcherbitsky, M.I. Demchuk, N.V. Kuleshov, V.I. Levchenko, V.N. Yakimovich, S. Girard, R. Moncorgé. Optics Communications **192**, 1-2, 65 (2001) 4
6. C.W. Robertson, D. Williams J. Opt. Soc. Amer. **61**, 1316 (1971). 5
7. J. Breguet, A.F. Umyskov, W.A. Luethy, I.A. Shcherbakov, H.P. Weber, "IEEE Journal of Quantum Electronics. **27**, 2, 274 (1991).
8. S. Schnell, V.G. Ostroumov, J. Breguet, W.A. Luethy, I.A. Shcherbakov, H.P. Weber, IEEE Journal of Quantum Electronics. **26**, 6, 1111 (1990).
9. V.N. Yakimovich, V.I. Levchenko, G.P. Yablonski, V.I. Konstantinov, L.I. Postnova, A. A. Kutas. Journal of Crystal Growth **198-199**, 2, 975 (1999) -6
10. J.J. Adams, C. Bibeau, R.H. Page, D.M. Krol, L.H. Furu, S.A. Payne Optics Letters **24**, 23, 1720 (1999). 7
11. V.G. Shcherbitsky, S. Girard, M. Fromager, R. Moncorgé, N.V. Kuleshov, V.I. Levchenko, V.N. Yakimovich, B. Ferrand. Appl Phys B **74**, 4-5, 367 (2002).