Академия наук УзССР
ИНСТИТУТ ЯДЕРНОЙ ФИЗИКИ

Препринт №
Р-9-296

М.Х.Ашуров, И.Н.Насыров, П.К.Хабибуллаев

ПРЕОБРАЗОВАНИЕ ДЕФЕКТОВ В КРИСТАЛЛАХ ГСГГ ПРИ АКТИВАЦИИ ИОНАМИ ХРОМА

Ташкент

Печатается по постановлению редколлегии препринтов ИЯФ АН УзССР от 14.04.87

Исследовались спектры поглощения, наведенного поглощения, дозной зависимости наведенного поглощения, термостимулированная люминесценция кристаллов ГСГГ, номинально чистых и активированных ионами хрома и неодима с различной концентрацией.

Показано, что именно наличие ионов хрома в значительной концентрации подавляет образование наведенной окраски в кристаллах ГСГГ после γ-облучения при 300 К. Определены оптимальные с точки зрения минимума наводимой окраски значения концентрации ионов хрома. Установлен механизм подавления наведенной окраски, заключающийся в смещении уровня Ферми при активации ионами хрома. Путем численного моделирования оценены значения концентраций дефектов и вероятности захвата и рекомбинации зарядов в кристаллах ГСГГ.

Absorption and additional coloration spectrums, doze dependence of additional coloration, thermoglow of GSGG crystals, nominally pure and activated with cromium and neodimium ions in different concentrations, are investigated.

It is shown, that it is cromium ions presence in large concentration that decrease the additional coloration in GSGG crystals after γ-irradiation at 300 K. Optimum concentrations of cromium ions for the minimum of additional coloration are found. The mechanizm of the decrease of additional coloration, consisting in Fermi level displacement by cromium ions activation, is established. Defects concentration and localization and recombination possibilities of electrons and holes in GSGG crystals are estimated by computer modeling.

Введение

При активации ионами хрома кристаллов гадолиний-скандий-галлиевого граната (ГСГГ), являющихся основой нового высокоэффективного лазерного материала /I/, наблюдается подавление образования наведенного γ-облучением поглощения /2/, что, в свою очередь, обусловливает устойчивую работу лазеров на основе кристаллов ГСГГ-Cr,Nd при воздействии γ-излучения /3/. Цель настоящей работы - изучение причин подобного влияния ионов хрома на образование наведенного поглощения в кристаллах ГСГГ.

В данной работе приводятся результаты измерения спектров поглощения, наведенного поглощения, дозной зависимости наведенного поглощения, термостимулированной люминесценции, численного моделирования кинетики накопления наведенного поглощения в γ-облученных кристаллах ГСГГ, активированных хромом и неодимом с различной концентрацией.

Экспериментальные результаты

Кристаллы для исследований были выращены методом Чохральского. Концентрация хрома в образцах составляла от 0 до $6 \cdot 10^{20}$ см$^{-3}$, неодима - от 0 до $3 \cdot 10^{20}$ см$^{-3}$. Спектры поглощения снимались при 300 К в области 200-900 нм на спектрофотометре Specord M 40. Спектры наведенного поглощения получены как разность спектров поглощения до и после γ-облучения при 300 К. Облучение осуществлялось γ-источником ^{60}Co мощностью 1030 Р/с до дозы насыщения 10^6 Р. Дозная зависимость наведенного поглощения строилась на основании изменения интенсивности поглощения на длине волны λ = 540 нм в области прозрачности образцов с хромом от суммарного времени облучения. Термостимулированная люминесценция регистрировалась интегрально в области 200-800 нм в диапазоне 100-500 К при скорости нагрева 0,23 К/с.

На рис.1 приведены спектры поглощения кристаллов ГСГГ. В неактивированном кристалле наряду с узкими полосами поглощения ионов Gd^{3+} /4/ наблюдается некоторое увеличение интенсивности фонового поглощения в области $\lambda < 310$ нм, которое резко увеличивается при $\lambda < 230$ нм, приводя к практической непрозрачности кристалла в этой области. В активированном неодимом кристалле вместе с поглощением ионов Gd^{3+} и Nd^{3+} /5/ наблюдается значительный рост интенсивности УФ поглощения в области $\lambda < 310$ нм. В активированном хромом кристалле две широкие полосы с максимумами при 460 и 650 нм соответствуют переходам $^4A_2 \rightarrow {}^4T_2$ и $^4A_2 \rightarrow {}^4T_1$ ионов Cr^{3+} /6/.

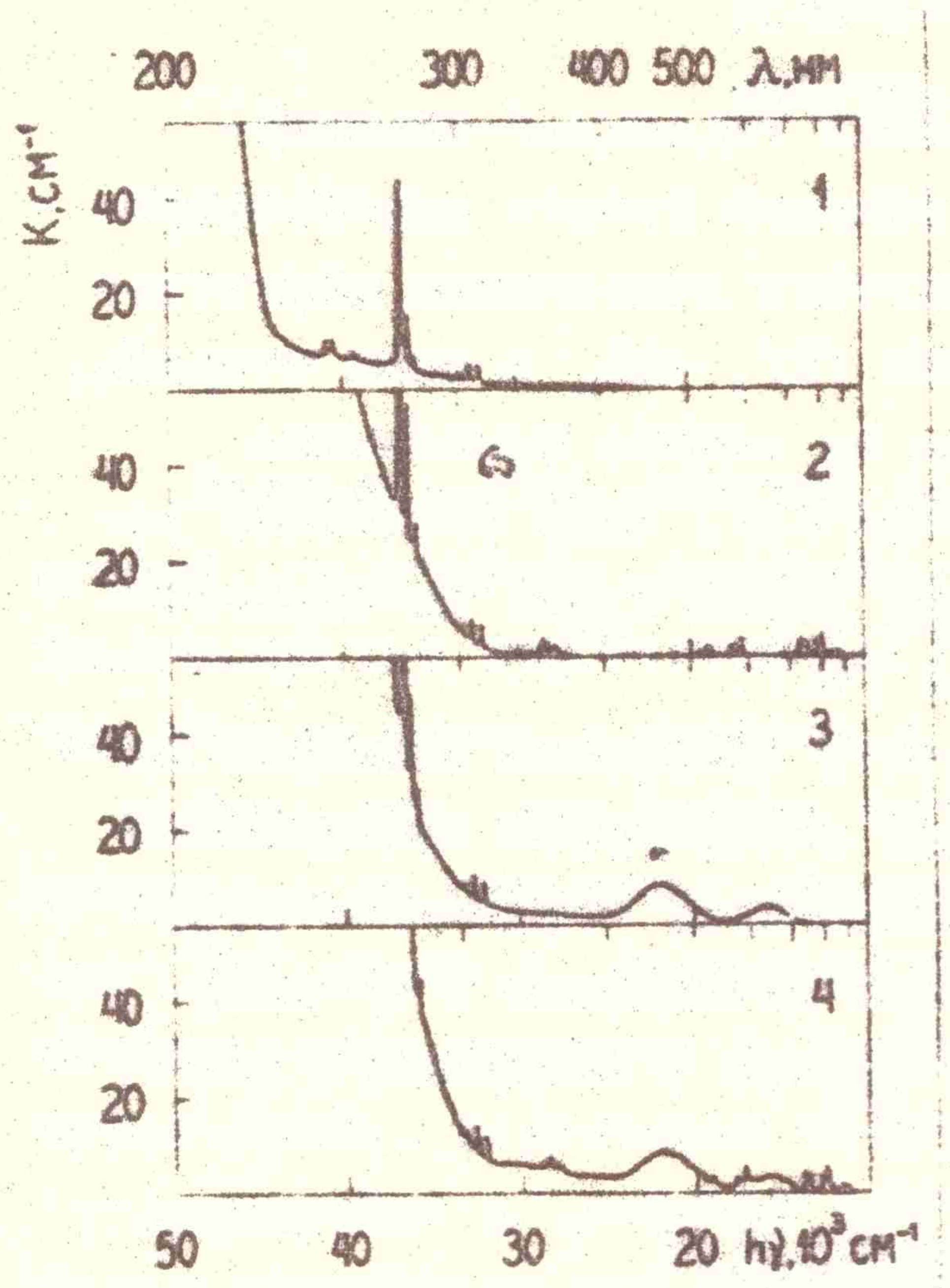


Рис.I. Спектры поглощения кристаллов ГСГГ: I – неактивированного, 2 – активированного неодимом с концентрацией $C_{Nd} = 2 \cdot 10^{20}$ $см^{-3}$, 3 – хромом $C_{Cr} = 10^{20}$ $см^{-3}$, 4 – хромом $C_{Cr} = 10^{20}$ $см^{-3}$ и неодимом $C_{Nd} = 2 \cdot 10^{20} см^{-3}$

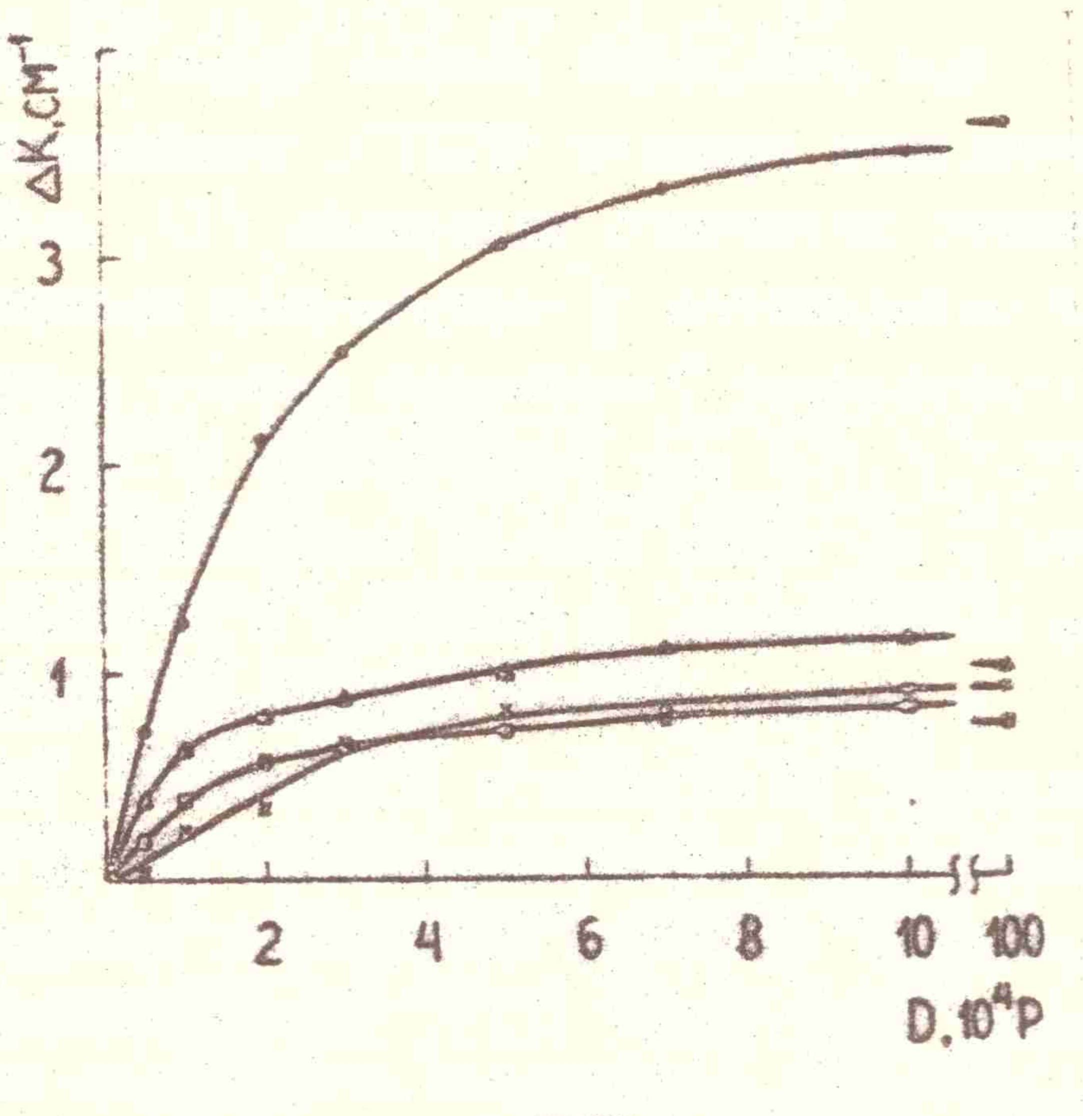
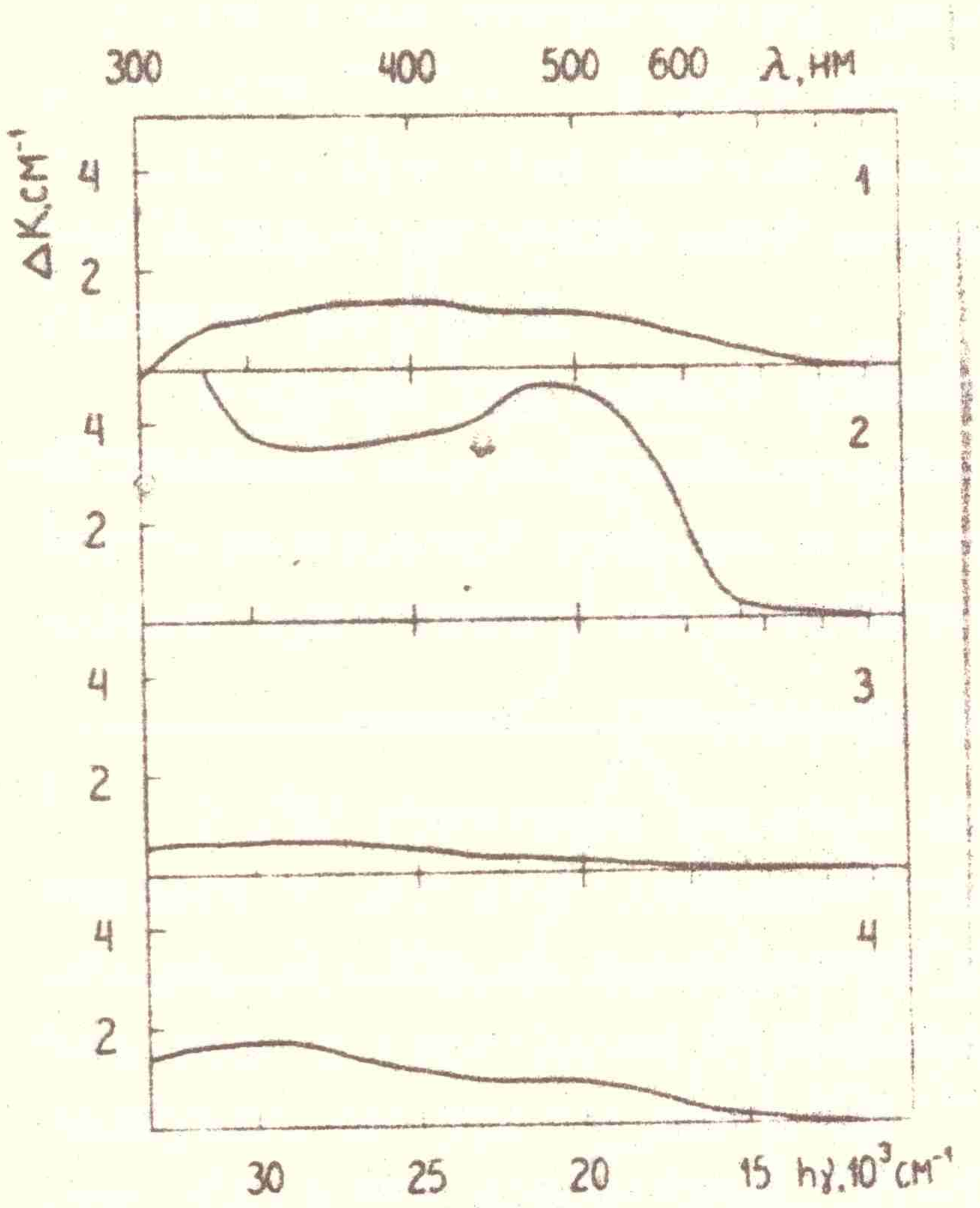


Рис.2. Дозная зависимость наведенного поглощения на длине волны λ =540 нм в кристаллах ГСГГ: ▲ – неактивированном, ● – активированном неодимом $C_{Nd} = 2 \cdot 10^{20}$ $см^{-3}$, ■ – хромом $C_{Cr} = 10^{20}$ $см^{-3}$, X – хромом $C_{Cr} = 10^{20}$ $см^{-3}$ и неодимом $C_{Nd} = 2 \cdot 10^{20} см^{-3}$

В УФ области $\lambda < 310$ нм интенсивность поглощения в этом кристалле больше, чем в активированном неодимом. В активированном одновременно хромом и неодимом кристалле интенсивность УФ поглощения в области $\lambda < 310$ нм максимальна из всех рассмотренных кристаллов.

На рис.2 приведена дозная зависимость наведенного поглощения на длине волны λ =540 нм, что совпадает с окном прозрачности кристаллов с хромом и находится вблизи максимума интенсивности наведенного поглощения. Во всех рассмотренных образцах при дозе 10^6 Р достигается насыщение наведенного поглощения. В неактивированном образце насыщение наведенного поглощения происходит довольно быстро и на невысоком уровне. В активированном неодимом образце интенсивность и время насыщения наведенного поглощения значительно больше, чем в неактивированном. В образцах с хромом и хромом с неодимом интенсивность и время насыщения наведенного поглощения малы по сравнению с образцами без хрома.



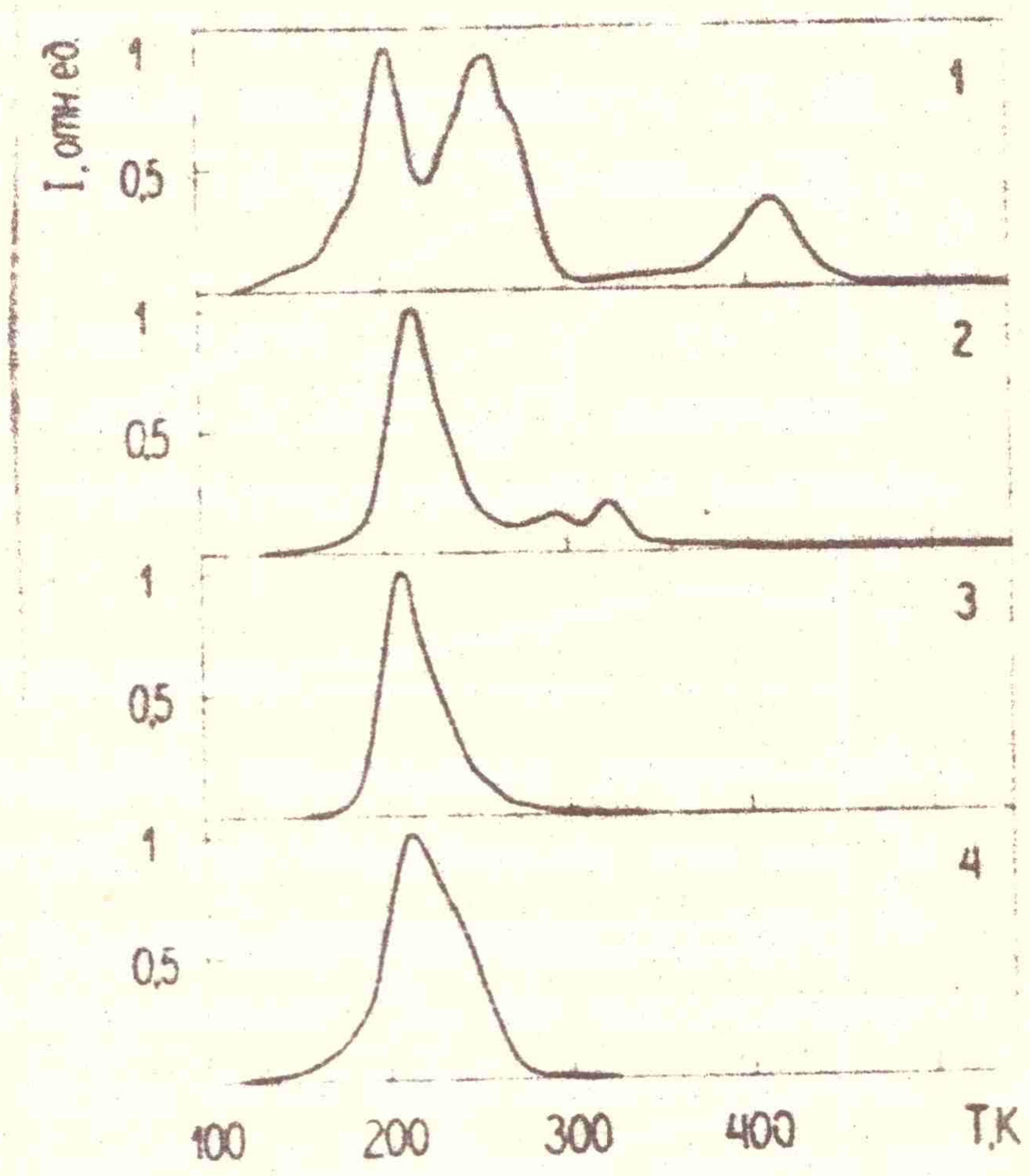


Рис.3. Спектры наведенного поглощения γ-облученных дозой 10^6 Р кристаллов ГСГГ: I - неактивированного, 2 - активированного хромом $C_{Cr} = 3\cdot 10^{19} см^{-3}$, 3 - $C_{Cr} = 5\cdot 10^{19}$ $см^{-3}$, 4 - $C_{Cr} = 10^{20}$ $см^{-3}$

Рис.4. Термостимулированная люминесценция γ-облученных при 77 К дозой 10^6 Р кристаллов ГСГГ (I-4 см.рис.3)

На рис.3 приведены спектры наведенного поглощения γ-облученных дозой заведомого насыщения 10^6 Р кристаллов ГСГГ с различной концентрацией ионов хрома. В неактивированном образце имеется широкая бесструктурная полоса наведенного поглощения в области 300-800 нм. В активированном хромом с концентрацией $C_{Cr} = 3\cdot 10^{19}$ $см^{-3}$ образце интенсивность наведенного поглощения в области накачки $\lambda > 360$ нм увеличивается в 4-5 раз. В образцах с хромом $C_{Cr} = 5\cdot 10^{19}$ $см^{-3}$ и $C_{Cr} = 10^{20}$ $см^{-3}$ интенсивность наведенного поглощения в области накачки мала по сравнению с активированным хромом $C_{Cr} = 3\cdot 10^{19}$ $см^{-3}$ образцом и даже меньше, чем в неактивированном.

На рис.4 приведены кривые термостимулированной люминесценции γ-облученных при 77 К дозой 10^6 Р кристаллов ГСГГ с различной концентрацией хрома. В неактивированном образце имеются пики с максимумами при 205, 260, 415 К. В образце с хромом с концентрацией $C_{Cr} = 3\cdot 10^{19}$ $см^{-3}$ имеются широкий пик с максимумом при 210 К и пики с максимумами при 300 и 320 К. В образцах с хромом $C_{Cr} = 5\cdot 10^{19}$ и $C_{Cr} = 10^{20}$ $см^{-3}$ наблюдается один интенсивный широкий пик

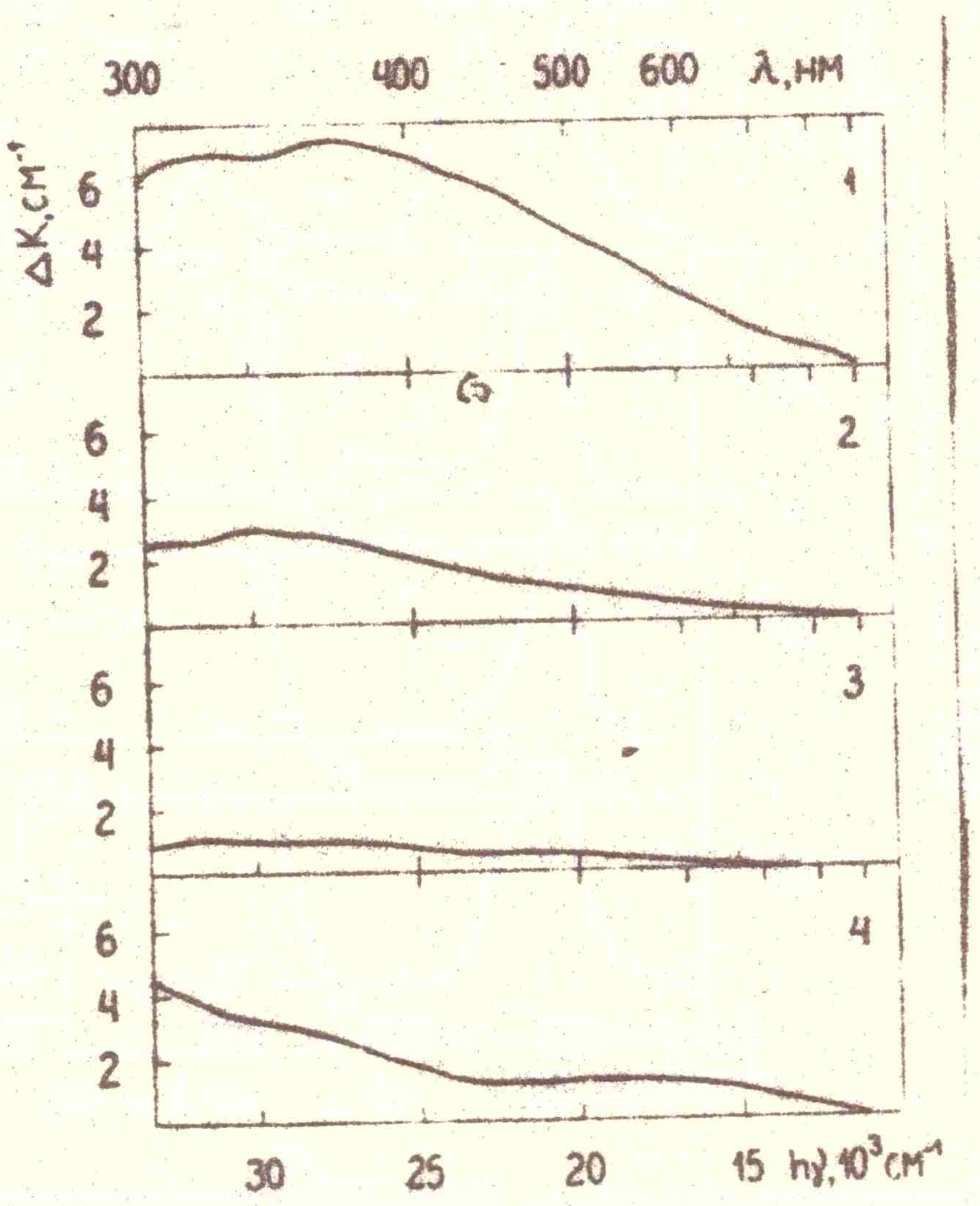


Рис.5. Спектры наведенного поглощения γ-облученных дозой 10^6 Р кристаллов ГСГГ: I - активированного неодимом $C_{Nd}=2\cdot10^{20}$ см$^{-3}$, 2 - неодимом $C_{Nd}=2\cdot10^{20}$ см$^{-3}$ и хромом $C_{Cr}=10^{20}$ см$^{-3}$, 3- $C_{Nd}=2\cdot10^{20}$ см$^{-3}$ и $C_{Cr}=2\cdot10^{20}$ см$^{-3}$, 4- $C_{Nd}=2\cdot10^{20}$ см$^{-3}$ и $C_{Cr}=6\cdot10^{20}$ см$^{-3}$

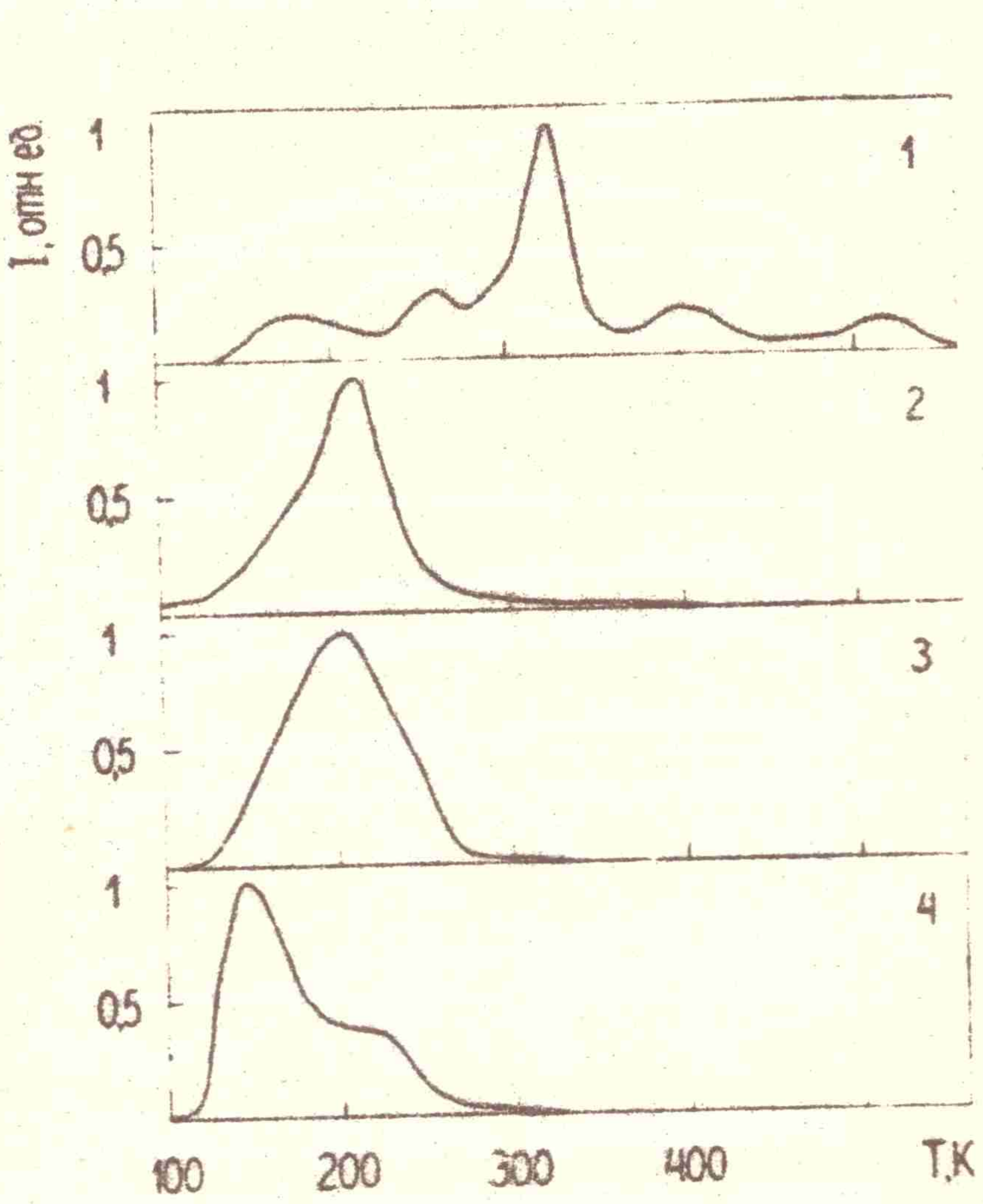


Рис.6. Термостимулированная люминесценция γ-облученных при 77 К дозой 10^6 Р кристаллов ГСГГ (I-4 см. рис. 5)

с максимумом при 2I0 К.

На рис.5 приведены спектры наведенного поглощения γ-облученных дозой заведомого насыщения 10^6 Р кристаллов ГСГГ с постоянным и близким к оптимальному содержанию неодима $C_{Nd}=2\cdot10^{20}$ см$^{-3}$ /7/ и различной концентрацией хрома. В образце без хрома наведенное поглощение наблюдается в виде широкой полосы во всей рассматриваемой области 300-900 нм. В образце с концентрацией хрома $C_{Cr}=10^{20}$ см$^{-3}$ интенсивность наведенного поглощения значительно меньше, чем в образце без хрома. В образце с концентрацией хрома $C_{Cr}=2\cdot10^{20}$ см$^{-3}$ по сравнению с другими исследуемыми кристаллами интенсивность наведенного поглощения минимальна, а в образце с $C_{Cr}=6\cdot10^{20}$ см$^{-3}$ интенсивность наведенного поглощения одного порядка с образцом с $C_{Cr}=10^{20}$ см$^{-3}$.

На кривых термостимулированной люминесценции кристаллов ГСГГ с хромом и неодимом (рис.6) также, как и в кристаллах без неодима, с увеличением концентрации хрома наблюдается исчезновение пиков в области $T > 300$ К и рост интенсивности пиков с максимумами при $T < 300$ К. При этом сначала растет пик с максимумом при 210 К, а при дальнейшем увеличении концентрации хрома растет пик с максимумом при 140 К.

В случае постоянной концентрации хрома $C_{Cr} = 10^{20}$ см$^{-3}$ и увеличении концентрации неодима от 0 до $3 \cdot 10^{20}$ см$^{-3}$ интенсивность наведенной окраски и кривые термостимулированной люминесценции существенно не изменяются.

Обсуждение результатов

В /8/ приведены спектры поглощения кристаллов иттрий-алюминиевого и иттрий-галлиевого гранатов, активированных хромом. В области $\lambda < 300$ нм наблюдается увеличение поглощения, которое связывается с переходами с основного состояния $^4A_2$ на высоколежащие возбужденные уровни ионов Cr^{3+}. Ранее нами было показано, что при облучении кристаллов ГСГГ-Cr при 77 К УФ частью спектра излучения ртутной лампы $\lambda > 260$ нм происходило накопление зарядов на уровнях дефектов, освобождение и рекомбинация которых при нагреве облученных кристаллов обусловливало термостимулированную люминесценцию с максимумом при 210 К /9/. Следовательно, по крайней мере часть поглощения в УФ области обусловлена не внутрицентровыми переходами дефектных центров или примесных ионов, а связана с переходами зарядов между пространственно разделенными дефектами.

Если исходить из того, что кристаллы граната представляют собой широкозонный диэлектрик с шириной запрещенной зоны, например, для кристалла иттрий-алюминиевого граната (ИАГ) $8 \pm 0,05$ эВ /10/ ($E_z = 64\,500$ см$^{-1}$, $\lambda_z = 155$ нм) и граница заполненных и незанятых уровней (уровень Ферми E_F) проходит посредине запрещенной зоны $E_F = 32\,000$ см$^{-1}$ ($\lambda_F = 310$ нм), то наблюдаемое в кристаллах ГСГГ поглощение в УФ области $\lambda < 310$ нм можно интерпретировать как поглощение при разрешенных переходах электронов с заполненных уровней ниже уровня Ферми в зону проводимости.

Для анализа зависимости кинетики накопления наведенной окраски, пропорциональной числу захваченных зарядов во время облучения, от концентрации дефектов (рис.2) было проведено численное моделирование рекомбинационных процессов с использованием представлений, изложенных в /11/.

Рассмотрим в первую очередь дефекты, создающие наиболее глубокие уровни вблизи середины запрещенной зоны, ответственные за стабильную при комнатной температуре наведенную окраску. Положим, что в кристаллах имеются всего два типа дефектов, создающих, соответственно, два глубоких уровня вблизи середины запрещенной зоны, являющейся одновременно границей заполненных и незанятых состояний. Обозначим концентрацию дефектов, создающих уровень выше уровня Ферми E_F как n_{01}, ниже E_F как n_{02}. Каждый дефект может быть как центром захвата, так и центром рекомбинации со своими значениями вероятности. Обозначим концентрацию захваченных зарядов на уровнях как n_1 и n_2. Так как уровни приняты расположенными глубоко, то тепловым освобождением захваченных зарядов можно пренебречь. Также ввиду близости уровней к середине запрещенной зоны и, следовательно, друг к другу можно для удобства расчетов положить равными вероятности захвата и рекомбинации.

При γ-облучении источником мощностью М будут образовываться свободные электроны и дырки с концентрацией N^- и N^+. Отсюда, следуя /II/, можно выразить скорости изменения концентраций свободных и захваченных зарядов:

$$
\begin{aligned}
dn_1/dt &= \beta\cdot(n_{01}-n_1)\cdot N^- - \beta\cdot n_1\cdot N^+ \\
dn_2/dt &= \beta\cdot(n_{02}-n_2)\cdot N^+ - \beta\cdot n_2\cdot N^- \\
dN^+/dt &= \alpha\cdot M - \beta\cdot n_1\cdot N^+ - \beta\cdot(n_{02}-n_2)\cdot N^+ \\
dN^-/dt &= \alpha\cdot M - \beta\cdot n_2\cdot N^- - \beta\cdot(n_{01}-n_1)\cdot N^-
\end{aligned}
\qquad (I)
$$

Здесь $\alpha = 8\cdot 10^{12}$ $р^{-1}\cdot см^{-3}$ - сечение образования свободных электронов и дырок в твердом теле /I2/, $\beta = 10^{-18}$ $см^3/с$ - вероятность их захвата и рекомбинации. Значение β выбрано исходя из того, что рекомбинационная люминесценция в кристаллах граната, в которых нет пиков термостимулированной люминесценции с максимумом около 300 К, практически полностью заканчивается за время меньше 40 с /I3/.

Систему (I) можно дополнить условием электронейтральности

$$n_1 + N^- = n_2 + N^+, \qquad (2)$$

которым можно заменить одно из уравнений системы или использовать для контроля точности вычислений.

При экспериментальном определении дозной зависимости наведенного поглощения спектр поглощения регистрируется через 2 мин после облучения. Если характеризовать наведенную окраску числом захваченных зарядов, то можно путем численного моделирования исследовать влияние концентрации дефектов n_{0I} и n_{02} на интенсивность и скорость насыщения наведенной окраски, т.е. на количество и скорость накопления захваченных зарядов n_I и n_2.

Система (I) решалась путем прямого интегрирования с шагом по времени dt =0,0I с. Полученные в результате расчетов значения концентраций захваченных зарядов для различных концентраций дефектов приведены в таблице. Ошибка вычислений концентраций, оце-

Таблица

Концентрация захваченных зарядов при различных дозах облучения и концентрациях дефектов

Доза, Р	Концентрация дефектов, см$^{-3}$			
	$2\cdot10^{17}$ $2\cdot10^{17}$	$6\cdot10^{17}$ $6\cdot10^{17}$	$9\cdot10^{16}$ $3{,}1\cdot10^{17}$	$9\cdot10^{16}$ $1{,}11\cdot10^{18}$
	Концентрация захваченных зарядов, см$^{-3}$			
$5\cdot10^{3}$	$3{,}27\cdot10^{16}$	$3{,}71\cdot10^{16}$	$2{,}87\cdot10^{16}$	$2{,}83\cdot10^{16}$
10^{4}	$5{,}51\cdot10^{16}$	$7{,}03\cdot10^{16}$	$4{,}58\cdot10^{16}$	$4{,}73\cdot10^{16}$
$2\cdot10^{4}$	$7{,}97\cdot10^{16}$	$1{,}24\cdot10^{17}$	$6{,}11\cdot10^{16}$	$6{,}66\cdot10^{16}$
$3\cdot10^{4}$	$9{,}08\cdot10^{16}$	$1{,}65\cdot10^{17}$	$6{,}66\cdot10^{16}$	$7{,}53\cdot10^{16}$
$5\cdot10^{4}$	$9{,}80\cdot10^{16}$	$2{,}21\cdot10^{17}$	$6{,}92\cdot10^{16}$	$8{,}10\cdot10^{16}$
$7\cdot10^{4}$	$9{,}95\cdot10^{16}$	$2{,}53\cdot10^{17}$	$6{,}95\cdot10^{16}$	$8{,}24\cdot10^{16}$
10^{5}	$9{,}99\cdot10^{16}$	$2{,}79\cdot10^{17}$	$6{,}95\cdot10^{16}$	$8{,}27\cdot10^{16}$
10^{6}	$9{,}99\cdot10^{16}$	$3{,}00\cdot10^{17}$	$6{,}95\cdot10^{16}$	$8{,}27\cdot10^{16}$

ненная по (2), не превышала $8\cdot10^{14}$ см$^{-3}$. Рассмотрено 4 случая: I – при равных концентрациях дефектов $n_{0I}=n_{02}=2\cdot10^{17}$ см$^{-3}$; 2 – при равных, но больших по сравнению с I-ым вариантом, концентрациях $n_{0I}=n_{02}=6\cdot10^{17}$ см$^{-3}$; 3 – при меньшей концентрации одного типа дефектов $n_{0I}=9\cdot10^{16}$ см$^{-3}$, $n_{02}=3{,}1\cdot10^{17}$ см$^{-3}$; 4 – при малой концентрации одного типа $n_{0I}=9\cdot10^{16}$ см$^{-3}$ и увеличенной концентрации дефектов другого типа $n_{02}=1{,}11\cdot10^{18}$ см$^{-3}$.

Получено, что: I – общее уменьшение числа дефектов обоих типов приводит к уменьшению количества и увеличению скорости накопления захваченных зарядов, 2 – такой же результат получается и при уменьшении числа дефектов только одного типа, 3 - даже при одновременном увеличении числа дефектов другого типа, 4 - даже если в сумме общее число дефектов повышается. Наблюдаемая экспериментально (рис.2) сходная дозная зависимость накопления наведенной окраски позволяет использовать полученные значения для оценки концентрации дефектов в кристаллах ГСГГ без активатора (I), с неодимом (2), с хромом (3), с хромом и неодимом (4).

При исследовании концентрационной зависимости наведенной окраски в γ-облученных при 300 К кристаллах ИАГ с хромом было получено, что при малых концентрациях хрома наведенная окраска весьма значительна /I4/. С увеличением концентрации хрома интенсивность наведенной окраски резко падает. В /I5/ было показано, что в кристаллах ГСГГ при активации хромом происходит изменение зарядового состояния наиболее глубоких уровней вблизи середины запрещенной зоны, т.е. уровень Ферми смещается. Судя по полученным результатам в рассматриваемых кристаллах ГСГГ активация хромом с концентрацией порядка 10^{20} см$^{-3}$ и более приводит к такому смещению уровня Ферми, что тепловой энергии при 300 К оказывается достаточно для практически полного освобождения всех захватываемых во время облучения зарядов одного из знаков. Рекомбинация с захваченными зарядами противоположного знака обусловливает восстановление спектров поглощения. В связи с этим в практически важной области $\lambda > 360$ нм (области поглощения ионов Cr^{3+} в кристаллах ГСГГ) наведенная окраска мала.

Остающаяся часть наведенной окраски связана с микронеоднородностями, наличие которых определялось по деполяризации света в /I6/. Вблизи поверхностей таких областей зонная схема уровней видоизменяется /II/, вследствие чего возможен захват зарядов в хромосодержащих кристаллах граната и при $T > 300$ К. Поэтому появляется необходимость оптимизации концентраций примесных ионов с точки зрения минимума наведенной окраски. Как следует из приведенных результатов для кристаллов ГСГГ-Cr,Nd оптимум находится около значений $C_{Cr} = 2 \cdot 10^{20}$ см$^{-3}$ и $C_{Nd} = 2 \cdot 10^{20}$ см$^{-3}$.

Таким образом, наличие ионов хрома не только существенно повышает эффективность лазеров на основе кристаллов ГСГГ, но и обеспечивает стабильность работы при воздействии жестких квантов. При этом обнаружено, что оптимальные значения концентраций примесных ионов с точки зрения генерационных /7/ и радиационных параметров весьма близки.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

I. Жариков Е.В., Ильичев Н.Н., Лаптев В.В., Малютин А.А. [и др.]. Спектрально-люминесцентные и генерационные свойства кристаллов гадолиний-скандий-галлиевого граната, активированных ионами неодима и хрома. -Квантовая электроника, I983, т.I0, № I, с.I40-I44.

2. Ашуров М.Х., Жариков Е.В., Лаптев В.В., Насыров И.Н. [и др.]. Влияние ионов хрома и неодима на образование центров окраски в кристаллах гадолиний-скандий-галлиевого граната. -Изв. АН СССР. Сер.физ., I984, т.48, № 7, с.I343-I345.

3. Жариков Е.В., Куратев И.И., Лаптев В.В., Насельский С.П.[и др.]. Влияние УФ и γ-облучения на генерационные характеристики неодимовых лазеров. -Изв. АН СССР. Сер.физ., I984, т.48, № 7, с.I35I-I353.

4. Азаматов З.Т., Арсеньев П.А., Чукичев М.В. Спектры гадолиния в монокристаллах алюмо-иттриевого граната. -Оптика и спектроскопия, I970, т.28, № 2, с.289-29I.

5. Kaminskii A.A., Bagdasarov Kh.S., Bogomolova G.A., Gritsenko M.M., Kevorkov A.M., Sarkisov S.E. Luminescence and Stimulated Emission of Nd^{3+} Ions in $Gd_3Sc_2Ga_3O_{12}$ Crystals. -phys. stat. sol.(a), 1976, v.34, No.2, p.K109-K114.

6. Жариков Е.В., Ильичев Н.Н., Калитин С.П., Лаптев В.В. [и др.]. Перестраиваемый лазер на кристалле гадолиний-скандий-галлиевого граната, работающий на электронно-колебательном переходе хрома. -Квантовая электроника, I983, т.I0, № 9, с.I9I6-I9I9.

7. Жариков Е.В., Калитин С.П., Лаптев В.В., Остроумов В.Г.[и др.]. Определение оптимальных концентраций неодима в кристаллах гадолиний-скандий-галлиевого граната. -Журнал прикладной спектроскопии, I984, т.4I, № 3, с.484-488.

8. Арсеньев П.А., Кустов Е.Ф. Элементы квантовой электроники.Ч.I. М.: МЭИ, I973, 274 с.

9. Ашуров М.Х., Насыров И.Н. Поглощение в УФ области, создаваемое ионами хрома в кристаллах гадолиний-скандий-галлиевого граната. -Тез. докл. VIII Всес. феофиловского симп. по спектроскопии кристаллов, активированных ионами редкоземельных и переходных металлов, ч.II, Свердловск, I985, с.6.

I0. Кулагин Н.А., Овечкин А.Е., Антонов Е.В. Центры окраски γ-облученного граната $Y_3Al_5O_{12}$. -Журнал прикладной спектроскопии, I985, т.43, № 3, с.478-484.

II. Гурвич А.М. Введение в физическую химию кристаллофосфоров. Изд.2. -М.: Высшая школа, 1982, 376 с.
I2. Срапионов А.С. Радиоактивность и дозиметрический контроль. Ташкент, Наука, 1964, 208 с.
I3. Ашуров М.Х., Насыров И.Н. Кинетика рекомбинационной люминесценции γ-облученных кристаллов ГСГГ:Cr^{3+}. -Тез. докл. VI Всес. совещ. по радиационной физике и химии ионных кристаллов, ч.I, Рига, 1986, с.215.
I4. Багдасаров Х.С., Пастернак Л.Б., Севастьянов Б.К. Радиационные центры окраски в кристаллах $Y_3Al_5O_{12}$:Cr^{3+}. -Квантовая электроника, 1977, т.4, № 8, с.1702-1707.
I5. Ашуров М.Х., Насыров И.Н., Осико В.В., Хабибуллаев П.К. Исследование УФ поглощения в кристаллах ГСГГ:Cr^{3+}. -Докл. АН СССР, 1986, т.289, № 2, с.344-347.
I6. Власов В.И., Данилов А.А., Никольский М.Ю., Щербаков И.А. Деполяризация света в прозрачных случайно-неоднородных средах с выраженным упруго-оптическим эффектом. -Препринт ИОФАН № 353. М.: 1986, 14 с.

Рукопись поступила в издательский отдел 13.04.87

Отпечатано на ротапринте ИЯФ АН УзССР
702132 п.Улугбек, Куйбышевского р-на, г.Ташкента
Издательский отдел ИЯФ АН УзССР
Заказ № 36 Тираж 275 Уч.-изд.л. 1,2
Редактор Д.Г.Галяутдинова
Подписано в печать 12.06.87 Р 15150
Цена 14 коп.