

ПРИМЕНЕНИЕ АНТИСТОКСОВОЙ ЛЮМИНЕСЦЕНЦИИ ДЛЯ СЧИТЫВАНИЯ ИНФОРМАЦИИ С ЭЛЕМЕНТОВ 3D ОПТИЧЕСКОЙ ПАМЯТИ

© 2015 М. А. Ефимова^{1,2}, В. И. Митрохин³, А. В. Чаплыгин²

¹Воронежский государственный университет, Университетская пл., 1, 394006 Воронеж, Россия

²Международный институт компьютерных технологий, ул. Солнечная, д. 29 «Б», 394026 Воронеж, Россия

³Воронежский государственный технический университет, Московский проспект, 14, 394026 Воронеж, Россия
e-mail: marinaefimova@rambler.ru

Поступила в редакцию 10.12.2014 г.

Аннотация. Исследованы зависимости интенсивности антистоксовой люминесценции не-сенсibilизированных и сенсibilизированных органическим красителем микрокристаллов хлориодида серебра от дозы облучения их ультрафиолетом при температуре жидкого азота и величины потока длинноволнового возбуждающего излучения. Оценено значение квантового выхода процесса антистоксового возбуждения микрокристаллов. Показана возможность разработки элементов 3D оптической памяти с параметром считывания 25—100 мкс/пиксель.

Ключевые слова: 3D оптическая память, низкотемпературный фотохимический процесс, антистоксовое возбуждение люминесценции, хлориодид серебра, сульфиды цинка и кадмия.

ВВЕДЕНИЕ

Решение проблемы записи и считывания информации в элементах трёхмерной оптической 3D памяти даёт возможность значительно увеличить емкость оптического носителя информации [1—3]. В качестве сред для записи предложены различные фотохромные органические материалы [4—9]. Запись информации в объёме оптического элемента осуществляется достаточно уверенно при использовании однофотонного и двухфотонного поглощения светочувствительной средой [10—13]. Наиболее эффективное считывание этой информации осуществляется люминесцентным методом [4, 5, 14]. Считывание записанной информации в этом случае требует, вообще говоря, возбуждение люминесценции коротковолновым излучением. Поэтому при многократном считывании считывающий луч будет деструктивно действовать на записанную информацию и создавать нежелательный фон. Использование нелинейного двухфотонного возбуждения требует существование пороговых интенсивностей, при которых среда невосприимчива к считывающему излучению [3, 7]. В работе [14] показано, что в этом случае из-за малости коэффициента поглощения при двухфотонном возбуждении интенсивность люминесценции снижена

по сравнению с однофотонным, что является серьёзным недостатком, влияющим, в конечном счёте, на эффективность работы устройства 3D памяти. В работе [15] предложено для записи оптической информации использовать многослойную галогенидосеребряную фотографическую эмульсию с последующим замещением серебряных частиц, возникающих после проявления, люминесцирующими органическими молекулами. При этом из-за сильного стоксового сдвига полосы люминесценции относительно полосы поглощения возможно эффективное однофотонное возбуждение люминесценции без создания паразитного фона. Однако оптическая память в этом случае неревверсивна и может быть применена лишь для архивной информации. В то же время ещё в работе [16] было показано, что под действием ультрафиолетового излучения при температуре жидкого азота в микрокристаллах хлористого серебра проходят низкотемпературные фотохимические процессы, в результате которых с малыми энергиями активации образуются неустойчивые центры, приводящие к снижению интенсивности стационарной люминесценции («усталость люминесценции»). При температуре выше 140 К эти центры распадаются. Дальнейшие исследования [17] показали, что эти

центры представляют собой адсорбированные частицы серебра атомно-молекулярной дисперсности, имеющие электронные состояния в области энергии 1.6—2.0 эВ, и могут быть обнаружены с помощью фотостимулированной вспышки люминесценции [17, 18]. А в работе [19] на этой основе была предложена реверсивная запись и люминесцентное считывание оптической информации, что было подробно исследовано в дальнейшем [20, 21]. Запись осуществлялась при температурах 77—120 К при облучении микрокристаллов ультрафиолетовым излучением с интенсивностью потока 10^{21} квант·см⁻²·с⁻¹. При их прогреве до 300 К центры, несущие оптическую информацию, разрушались, что приводило к возможности новой записи. Хотя возбуждение вспышки люминесценции проводится длинноволновым излучением, для которого кристаллы галоидного серебра прозрачны, применение такого способа записи и считывания информации для элементов 3D памяти также затруднительно ввиду того, что для возникновения вспышки люминесценции необходимо проводить возбуждение микрокристаллов ультрафиолетовым светом, действующим деструктивно по отношению к записанной информации. Кроме того, применение микрокристаллов галогенидов серебра запись и хранение оптической информации возможны лишь при низких температурах, что для практического использования предложенного способа записи и считывания информации крайне неудобно. Поэтому в работе [19] рассмотрена ещё одна возможность использования активированных медью микрокристаллов сульфида цинка, в которых под влиянием тех же потоков ультрафиолетового излучения при комнатных температурах идёт также фотохимический процесс, приводящий к формированию центров тушения люминесценции. На основании этого предложен способ записи оптической информации в варианте негативного изображения. Формирующиеся при этом центры разрушаются при прогреве до 400 К, что можно использовать для стирания и повторной записи информации. Однако и этот способ записи оптической информации трудно применить для элементов 3D памяти в связи с тем, что возбуждение люминесценции при её считывании также необходимо проводить коротковолновым излучением, которое может создавать паразитный фон.

Таким образом, существующие методы создания оптических элементов 3D памяти не являются в полной мере эффективными. Основные проблемы

в их реализации проявляются при считывании. Чаще всего это связано с деструктивными свойствами считывающего луча. В тоже время существует возможность антистоксового возбуждения люминесценции длинноволновым излучением, для которого кристаллы галоидного серебра и сульфидов цинка и кадмия прозрачны [22]. В работах [23, 24] было обнаружено, что центры, возникающие в кристаллах хлористого серебра с небольшой примесью иода при низкотемпературном фотохимическом процессе, участвуют в процессе антистоксового возбуждения люминесценции, а в присутствии адсорбированных органических молекул сенситизаторов на порядок и больше увеличивают интенсивность антистоксовой люминесценции. Другими словами, поскольку для антистоксового возбуждения люминесценции используется длинноволновое излучение, для которого кристаллы галогенида серебра прозрачны, представляется возможным способ считывания информации. Однако в литературе не акцентировалось внимание на вид зависимости интенсивности антистоксовой люминесценции от величины светового потока записывающего и считывающего излучения, а также нет данных относительно возможной скорости считывания информации. Цель данной работы — заполнить этот пробел в исследованиях. Хотя, как видно из вышеизложенного, эти исследования следовало бы проводить для сульфидов кадмия и цинка, люминесцирующих при комнатной температуре, в качестве объекта исследования был выбран хлоридид серебра в виду того, что для этого вещества хорошо изучено явление сенситизации антистоксовского свечения молекулами органических красителей.

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ЧАСТЬ

Исследования проводились для микрокристаллов $\text{AgCl}_{0.95}\text{I}_{0.05}$, полученных по стандартной методике [25] сливания водных растворов KI, NaCl и AgNO_3 в избытке ионов галогена при показателе содержания в растворе катионов $r_{\text{Ag}} = 7$. По данным рентгеноструктурного анализа (диффрактометр ДРОН-8) получаемая кристаллическая фаза представляла собой твёрдый раствор замещения. Для измерений использовался автоматизированный спектрально-люминесцентный комплекс, в котором регистрация излучения осуществлялась по методу счёта фотонов с помощью фотоумножителя [26]. Образцы размещались в вакуумном оптическом криостате, в котором достигалось давление 10^{-6} мм рт. ст. Исследования проводились при тем-

пературе 77 К. В этих условиях образцы имели в полосе 515 нм интенсивную полосу люминесценции с близким к единице квантовым выходом, возникающую по механизму Шена-Классенса [27]. Экспонирование образцов проводилось также при низкой температуре ультрафиолетовым излучением ртутной лампы ДРК-120, выделяемым светофильтрами УФС-6 и СЗС-22 (365 нм) при плотности потока 10^{16} квант/с·см². Время экспозиции менялось от 1 до 1000 с. Возбуждение антистоксовой люминесценции (АСЛ) образцов в указанной полосе осуществлялось излучением лампы накаливания СИ400, прошедшим через монохроматор МДР-23, с плотностью потока 10^{13} — 10^{15} квант/с·см² с длиной волны 670 нм (~1.85 эВ). Для измерения численного значения плотности потока применялся фотодиод ФД7К, имеющий линейную ватт-амперную характеристику в данном интервале интенсивности. Выбранные значения плотностей потоков экспонирования образцов и возбуждения АСЛ давали возможность оценить величину возможного деструктивного влияния возбуждающего излучения. Счёт фотонов антистоксового излучения осуществлялся в течение 0.01 с. Сенсибилизация проводилась этанольным раствором красителя № 5483 (соль 1.1'-диэтил-2,2'-хиноцианина и 3,3'-ди(γ-сульфапропила)-9-этил-4,5-бензо-4'',5''-[4'',5''-диметилтиено-(2'',3'')]-тиатизокарбонинбитаина) при концентрации, равной 10^{-5} моль на 1 моль $\text{AgCl}_{0.95}\text{I}_{0.05}$. Эта концентрация обеспечивает высокий квантовый выход АСЛ, а адсорбция молекул осуществляется в виде мономеров [24].

ПОЛУЧЕННЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

На рис. 1 представлены зависимости интенсивности АСЛ, измеренной вблизи максимумов спектральных кривых АСЛ, для несенсибилизированных и сенсибилизированных образцов микрокристаллов хлорида серебра от времени их облучения ультрафиолетовым излучением при температуре 77 К. Поскольку положение максимумов кривых заметно меняется для различных времён облучения [23, 28], длина волны 670 нм ($h\nu \sim 1.85$ эВ) для возбуждения была выбрана как наиболее близкая ко всем этим положениям. Эти зависимости для рассматриваемого временного диапазона ведут себя по-разному. Интенсивность АСЛ во втором случае значительно выше. Так, для 1 с облучения сенсибилизированные образцы интенсивность АСЛ превышает более чем в тридцать раз интенсивность свечения несенсибилизированных.

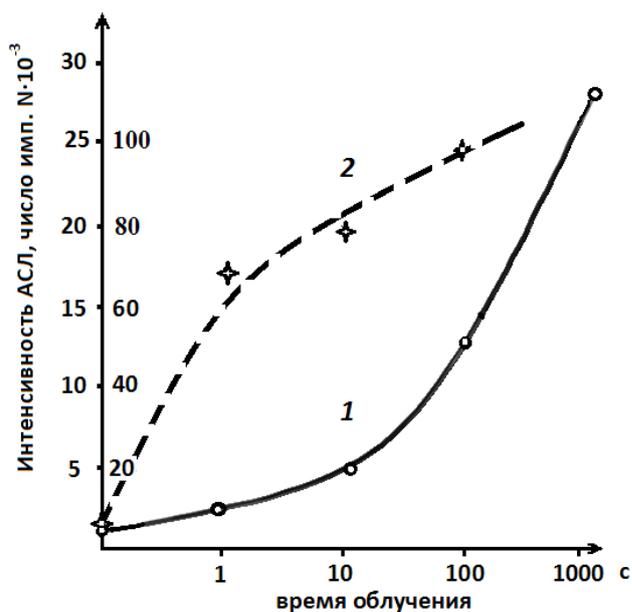


Рис. 1. Зависимости интенсивности антистоксовой люминесценции для несенсибилизированных (кривая 1) и сенсибилизированных (кривая 2) образцов микрокристаллов хлорида серебра от времени их облучения ультрафиолетовым излучением (10^{16} кв/см²·с) при температуре 77 К. Возбуждение осуществлялось квантами излучения, равными 1.85 эВ. Оцифровка ординаты слева соответствует кривой 1, справа — кривой 2

Для решения вопроса о возможности использования антистоксового возбуждения люминесценции важно знать, сколько квантов света может излучаться с каждого пикселя памяти при считывании информации. Для этого изучалась зависимость числа квантов антистоксовой люминесценции микрокристаллов от количества возбуждающих квантов, падающих на образец (рис. 2).

Видно, что полученные зависимости для сенсибилизированных и несенсибилизированных микрокристаллов являются сверхлинейными. Это соответствует двухквантовости процесса антистоксового возбуждения. Следует обратить внимание на то, что интенсивность возбуждающего излучения на два порядка меньше по сравнению с записывающим ультрафиолетовым излучением. Специальная проверка, заключающаяся в многократном и длительном возбуждении антистоксовой люминесценции исследуемых образцов, не привела к заметному изменению интенсивности свечения. Значения числа импульсов антистоксового излучения для сенсибилизированных и несенсибилизированных микрокристаллов, измеряемых за 0.01 с при возбуждении потоком $6 \cdot 10^{15}$ квант/с·см², различаются практически на порядок и достигают

величин $2.7 \cdot 10^4$ и $2.5 \cdot 10^5$ соответственно. Апертура оптической системы, собирающей свет с образца в щель спектрального прибора, не превышала $4 \cdot 10^{-3}$ рад. Коэффициент пропускания монохроматора МДР-23 в условиях эксперимента составлял 0.5. Учитывая приведенные данные и принимая коэффициент конверсии фотоумножителя равным 0.1, можно оценить квантовый выход процесса антистоксового возбуждения исследуемых микрокристаллов $\text{AgCl}_{0.95}\text{I}_{0.05}$, который оказался равным $\sim 10^{-3}$. Если считать площадь одного пикселя равной площади микрокристалла ($\sim 1 \text{ мкм}^2$), то оценка величины числа фотонов с учётом приведённых данных уверенное фиксирование сигнала (около 10 импульсов) можно осуществить за время 25—100 микросекунд. Это характеризует быстрдействие процесса считывания информации с помощью антистоксового возбуждения люминесценции для исследуемого материала оптической памяти.

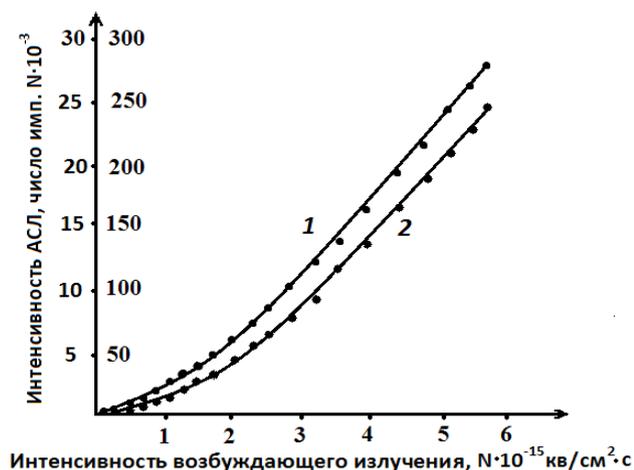


Рис. 2. Зависимость числа квантов антистоксовой люминесценции для несенсибилизированных (кривая 1) и сенсibilизированных (кривая 2) образцов микрокристаллов хлориодида серебра от количества возбуждающих квантов излучения (энергия квантов 1.85 эВ). Оцифровка ординаты слева соответствует кривой 1, справа — кривой 2

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Таким образом, исследование зависимости величины интенсивности люминесценции хлоридосеребряных микрокристаллов от времени их облучения ультрафиолетовым излучением при антистоксовом возбуждении, а также числа квантов антистоксового свечения от интенсивности возбуждающего длинноволнового излучения показало принципиальную возможность разработки

элементов оптической 3D памяти с люминесцентным считыванием. Квантовый выход процесса считывания равен 10^{-3} . Время считывания одного пикселя записи составляет 25—100 микросекунд. Запись и считывание информации на исследованном материале происходит при низких температурах. Повышение температуры записи и считывания возможно при переходе к сульфиду цинка и кадмия. Необходимые исследования антистоксового возбуждения люминесценции проведены [29, 30]. Важно обратить внимание на то, что адсорбированные атомы серебра на поверхности сульфида цинка и кадмия в совокупности с молекулами красителей образуют центры, участвующие в антистоксовом возбуждении [31]. Повышение скорости считывания в этом случае может быть осуществлено увеличением квантового выхода процесса возбуждения антистоксового свечения, что возможно при различных обработках поверхности кристаллов [32].

БЛАГОДАРНОСТИ

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (Проект № 13-02-97520 p_центра_a)

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Parthenopoulos D. A., Rentzepis P. M. // *Science*, 1989, vol. 245, pp. 843—845.
2. Hunter S., Kiamilev F., Esener S., Parthenopoulos D. A., Rentzepis P. M. // *Appl. Optics*, 1990, vol. 29, pp. 2058—2066.
3. Rentzepis P. M. US Patent № 5,268,862, 1993.
4. Барачевский В. А., Алфимов М. В., Назаров В. Б. // *Ж. научн. и прикл. фотогр.*, 1999, т. 44, № 3, с. 66—73.
5. Барачевский В. Ф. // *Химия высоких энергий*, 2003, т. 37, № 1, с. 8—19.
6. Барачевский В. А., Лашков Г. И., Цехомский В. А. *Фотохроматизм и его применение*. Москва, Химия, 1977, 280 с.
7. Dvornikov A. S., Malkin J., Rentzepis P. M. // *J. Phys. Chem.*, 1994, vol. 98, pp. 6746—6752.
8. Malkin J., Zelichenok A., Krongauz V., Dvornikov A. S., Rentzepis P. M. // *J. Amer. Chem. Soc.*, 1994, vol. 116, pp. 1101—1105.
9. Mizuno T., Yamasaki k., Tanamura Y., Misawa H. // *Jap. J. Appl. Phys.*, 2006, vol. 45, № 3A, pp. 1640—1647.
10. Манджиков В. Ф., Дарманян А. П., Барачевский В. А., Геулайтис Ю. Н. // *Оптика и спектроскопия*, 1972, т. 32, с. 412—413.
11. Акимов Д. А., Желтиков А. М., Коротеев Н. И., Магницкий С. А., Наумов А. Н., Сидоров-Бирюков Д. А., Фёдоров А. Б. // *Квантовая электроника*, 1996, т. 23, № 10, с. 871—875.

12. Akimov D. A., Zheltikov A. M., Koroteev N. I. // *Laser Phys.*, 1997, vol. 7, pp. 1242—1252.
13. Mizuno T., Yamasaki k., Misawa H. // *Jap. J. Appl. Phys.*, 2005, vol. 44, pp. 6593—6595.
14. Акимов Д.А., Желтиков А. М., Коротеев Н. И., Магницкий С. А., Наумов А. Н., Сидоров-Бирюков Д.А., Соколюк Н. Т., Федотов А. Б. // *Квантовая электроника*, 1998, т. 25, № 6, с. 563—570.
15. Шапиро Б. И. // *Химия высоких энергий*, 2007, т. 41, № 1, с. 47—51.
16. Latsyshev A. N., Kushnir M. A., Antacanova L. B. // *Phot. Science&Eng.*, 1979, vol. 23, № 6, pp. 338—343.
17. Латышев А. Н., Бокарев В. В., Волошина Т. В., Кушнир М. А., Расхожев В. Н., Антаканова Л. Б. // *Журн. прикл. спектроскопии*, 1982, т. 37, № 4, с. 580—585.
18. Латышев А. Н., Овчинников О. В. // *Вестник Воронежского государственного университета. Серия: физика, математика*, 2013, № 1, с. 63—93.
19. Клюев В. Г., Латышев А. Н., Малая Л. Я., Леонова Л. Ю., Кустов А. И. // *Журн. прикл. спектроскопии*, 1995, т. 62, № 3, с. 232—234.
20. Латышев А. Н., Овчинников О. В., Минаков Д. А., Смирнов М. С., Новиков П. В. // *Химия высоких энергий*, 2008, т. 42, № 7, с. 23—26.
21. Латышев А. Н., Овчинников О. В., Клюев В. Г., Смирнов М. С., Стаселько Д. И. // *Оптика и спектроскопия*, 2013, т. 114, № 4, с. 592—602.
22. Чукова Ю. П. *Антистоксова люминесценция и новые возможности её применения*. Москва, Советское радио, 1980, 193 с.
23. Овчинников О. В., Евлев А. Б., Ефимова М. А., Клюев В. Г., Латышев А. Н., Утехин А. Н., Холкина А. М. // *Журн. прикл. спектроскопии*, 2005, т. 72, № 6, с. 738—742.
24. Овчинников О. В., Воробьева Р. П., Евлев А. Б., Квашнина Н. В., Латышев А. Н., Утехин А. Н., Черных С. В., Смирнов М. С. // *Журн. прикл. спектроскопии*, 2006, т. 73, № 5, с. 592—596.
25. Мейкляр П. В. // *Физические процессы при образовании скрытого фотографического изображения*. Москва, Наука, 1972, 400 с.
26. Латышев А. Н., Овчинников О. В., Охотников С. С., Смирнов М. С., Клюев В. Г. // *Приборы и Техника Эксперимента*, 2004, № 6, с. 119—124.
27. Латышев А. Н., Овчинников О. В., Смирнов М. С. // *Конденсированные среды и межфазные границы*, 2004, т. 6, № 1, с. 70—74.
28. Latsyshev A. N., Ovchinnikov O. V., Evlev A. B., Utehin A. N., Smirnov M. S., Alpatova D. V., Efimova M. A., Leonova L. Yu., Kluev V. G., Kosyakova E. A., Holkina A. M., Cheryh S. V. // *Известия высших учебных заведений. Физика*, 2006, т. 49, № 10, Приложение, с. 258—261.
29. Овчинников О. В., Косякова Е. А., Леонова Л. Ю., Смирнов М. С., Евлев А. Б., Латышев А. Н., Утехин А. Н. // *Известия высших учебных заведений. Физика*, 2008, т. 51, № 3, с. 21—26.
30. Овчинников О. В., Смирнов М. С., Латышев А. Н., Леонова Л. Ю., Косякова Е. А., Клюев В. Г., Татьяна Е. П. // *Квантовая электроника*, 2010, т. 40, № 6, с. 490—494.
31. Овчинников О. В., Латышев А. Н., Смирнов М. С., Квашнина Н. В., Шатских Т. С. // *Оптика и спектроскопия*, 2013, т. 114, № 4, с. 603—612.
32. Овчинников О. В., Смирнов М. С., Косякова Е. А., Латышев А. Н., Клюев В. Г., Евлев А. Б., Утехин А. Н., Асеева Д. В. // *Физика и техника полупроводников*, 2009, т. 43, вып. 3, с. 364—368.

APPLICATION OF THE ANTISTOCS LUMINESCENCE FOR READING THE INFORMATION FROM ELEMENTS 3D OPTICAL MEMORY

©2015 M. A. Efimova^{1,2}, V. I. Mitrohin², A. V. Chaplygin²

¹Voronezh State University, Universitetskaya pl., 1, 394006 Voronezh, Russia

²International Institute of Computer Technologies, Solnechnaya, 29 b, 394026 Voronezh, Russia
e-mail: marinaefimova@rambler.ru

Received 10.12.2014

Abstract. Application optical 3D memories considerably increase capacity of a data carrier [1—3]. Photochrom organic materials enable to carry out record of the information at use of one-photon and two-photon absorption by the photosensitive environment [4—13]. The most effective reading of this information is carried out by a luminescent method [4, 5, 14]. However at one-photon excitation the reading out beam destructively acts on the written down information while two-photon excitation is ineffective because of small intensity of a luminescence [14]. Application of replacement of the silver centers in silver halide layers by luminescent molecules with a high level of a quantum output

probably for irreversible optical memory [15]. Reversible records and reading can be reached if the low-temperature photochemical process and flash of a luminescence or effect of suppression of a luminescence be used [16—21]. For this purpose crystals of sulfide of zinc and the cadmium luminescent at a room temperature can be used. But also in this case it is inevitable the information destruction since before stimulation of flash or for supervision of suppression it is necessary to illuminate samples with ultra-violet radiation. The antistocs excitation of a luminescence allows to lower effect of images destruction [22], and the adsorbed molecules of some organic molecules increase intensity of antistocs luminescence (ASL) [23, 24]. The purpose of the given work was research of dependence of antistocs luminescence intensity and an estimation of speed of process of reading of the written down information.

Microcrystals $\text{AgCl}_{0.95}\text{I}_{0.05}$ received by a standard technique [25] was investigated. Creation of the centers participating at antistocs excitation of crystals was carried out by ultra-violet radiation. Excitation ASL was carried out by radiation of a filament lamp after a passage through the monochromator. The density of a stream made 10^{13} — 10^{15} quantum/sec· cm^2 . The wave length is 670 nanometers (~ 1.85 eV). Intensity of a luminescence was measured by a method of the account of photons [26, 27] in a strip of 515 nanometers. All researches were carried out in vacuum cryostat at pressure of 10^{-6} mm hg and to temperature 77 K. The sensibilization was carried out by an ethanol solution of dye 5483 at the concentration equal 10^{-5} mol on 1 mol of $\text{AgCl}_{0.95}\text{I}_{0.05}$ which molecules are adsorbed in the form of a monomer [24].

On fig. 1 it is visible, that ASL intensity measured near to maxima of spectral curves for sensitized and unsensitized samples of $\text{AgCl}_{0.95}\text{I}_{0.05}$ microcrystals at an exposition in 1 sec differs in thirty times. Dependence of number of quanta antistocs luminescence from number of exciting quanta is superlinear (fig. 2). The number of antistocs radiations impulses for sensitized and unsensitized microcrystals measured for 0.01c at excitation by a stream $6 \cdot 10^{15}$ quantum/sec· cm^2 reaches sizes $2.7 \cdot 10^4$ and $2.5 \cdot 10^5$ accordingly.

The account of the aperture of optical system, transition factor of monochromator and conversion of the photo multiplier resulted in size of a quantum output of process antistocs excitation which has appeared equal 10^{-3} . It has led to an estimation of time of fixing of the signal consisting of 10 impulses from the area 1 μm^2 which has appeared equal 25 — to 100 micro seconds. It characterizes speed of process of reading of the information in a considered way.

Thus, research of dependence of size of intensity of luminescence silver chloriodide microcrystals from time of their irradiation ultra-violet radiation at antistocs excitation has shown a basic opportunity of development of elements optical 3D memory with luminescent reading. The rise of temperature of records and reading is possible at transition to sulfides of zinc and cadmium [29—31]. Increase of speed of reading in this case can be carried out by increase in a quantum output of process of excitation antistocs luminescence that is possible at various treatments of a crystals surface [32].

Keywords: 3D optical memory, the low-temperature photochemical process, the antistocs excitation of a luminescence, silver chloriodide, sulfides of zinc and cadmium.

REFERENCES

1. Parthenopoulos D. A., Rentzepis P. M. *Science*, 1989, vol. 245, pp. 843—845. DOI:10.1126/science.245.4920.843
2. Hunter S., Kiamilev F., Esenner S., Parthenopoulos D. A., Rentzepis P. M. *Appl. Optics*, 1990, vol. 29, pp. 2058—2066. DOI:10.1126/science.245.4920.843
3. Rentzepis P. M. *US Patent* № 5,268,862, 1993.
4. Barachevskii V. A., Alfimov M. V., Nazarov V. B. *Zh. nauchn. i prikl. fotogr.*, 1999, vol. 44, no. 3, pp. 66—73.
5. Barachevskii V. F. *Khimiya vysokikh energii*, 2003, vol. 37, no. 1, pp. 8—19.
6. Barachevskii V. A., Lashkov G. I., Tsekhomskii V. A. *Fotokhromatizm i ego primeneniye*. Moskva, Khimiya Publ., 1977, 280 p.
7. Dvornikov A. S., Malkin J., Rentzepis P. M. *J. Phys. Chem.*, 1994, vol. 98, pp. 6746—6752. DOI: 10.1021/j100078a016
8. Malkin J., Zelichenok A., Krongauz V., Dvornikov A. S., Rentzepis P. M. *J. Amer. Chem. Soc.*, 1994, vol. 116, pp. 1101—1105. DOI: 10.1021/ja00082a037
9. Mizuno T., Yamasaki k., Tanamura Y., Misawa H. *Jap. J. Appl. Phys.*, 2006, vol. 45, no. 3A, pp. 1640—1647. DOI:10.1143/JJAP.45.1640
10. Mandzhikov V. F., Darmanyan A. P., Barachevskii V. A., Geulaitis Yu.N. *Optika i spektroskopija*, 1972, vol. 32, pp. 412—413.
11. Akimov D. A., Zheltikov A. M., Koroteev N. I., Magnitskii S. A., Naumov A. N., Sidorov-Biryukov D.A., Fedorov A. B. *Kvantovaya elektronika*, 1996, vol. 23, no. 10, pp. 871—875.

12. Akimov D. A., Zheltikov A. M., Koroteev N. I. *Laser Phys.*, 1997, vol. 7, pp. 1242—1252.
13. Mizuno T., Yamasaki k., Misawa H. *Jap. J. Appl. Phys.*, 2005, vol. 44, pp. 6593—6595. DOI:10.1143/JJAP.44.6593
14. Akimov D.A, Zheltikov A. M., Koroteev N. I., Magnitskii S. A., Naumov A. N., Sidorov-Biryukov D.A., Sokolyuk N. T., Fedotov A. B. *Kvantovaya elektronika*, 1998, vol. 25, no. 6, pp. 563—570.
15. Shapiro B. I. *Khimiya vysokikh energii*, 2007, vol. 41, no. 1, pp. 47—51.
16. Latyshev A. N., Kushnir M. A., Antacanova L. B. *Phot. Science&Eng.*, 1979, vol. 23, no. 6, pp. 338—343.
17. Latyshev A. N., Bokarev V. V., Voloshina T. V., Kushnir M. A., Raskhozhev V. N., Antakanova L. B. *Zhurn. prikl. spektroskopii*, 1982, vol. 37, no 4, pp. 580—585.
18. Latyshev A. N., Ovchinnikov O. V. *Vestnik Voronezhskogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya: fizika, matematika*, 2013, no. 1, pp. 63—93. Available at: http://www.vestnik.vsu.ru/program/view/view.asp?sec=phys-math&year=2013&num=01&f_name=2013—01—06
19. Klyuev V. G., Latyshev A. N., Malaya L. Ya., Leonova L. Yu., Kustov A. I. *Zhurn. prikl. spektroskopii*, 1995, vol. 62, no. 3, pp. 232—234.
20. Latyshev A. N., Ovchinnikov O. V., Minakov D. A., Smirnov M. S., Novikov P. V. *Khimiya vysokikh energii*, 2008, vol. 42, no. 7, pp. 23—26.
21. Latyshev A. N., Ovchinnikov O. V., Klyuev V. G., Smirnov M. S., Stasel'ko D.I. *Optika i spektroskopiya*, 2013, vol. 114, no. 4, pp. 592—602.
22. Chukova Yu.P. *Antistoksova lyuminestsentsiya i novye vozmozhnosti ee primeneniya*. Moskva, Sovetskoe radio. Publ., 1980, 193 p.
23. Ovchinnikov O. V., Evlev A. B., Efimova M. A., Kluev V. G., Latyshev A. N., Utekhin A. N., Kholina A. M. *J. of Applied Spectroscopy*, 2005, vol. 72, no. 6, pp. 809—813. Available at: http://download.springer.com/static/pdf/659/art%253A10.1007%252Fs10812-006-0007-2.pdf?auth66=1423564509_c6d9d3319371e3f40be61f4a4bf51462&ext=.pdf
24. Ovchinnikov O. V., Vorob'eva R.P., Evlev A. B., Kvashnina N. V., Latyshev A. N., Utekhin A. N., Chernykh S. V., Smirnov M. S. *Zhurn. prikl. spektroskopii*, 2006, vol. 73, no 5, pp. 592—596.
25. Meiklyar P. V. *Fizicheskie protsessy pri obrazovanii skrytogo fotograficheskogo izobrazheniya*. Moscow, Nauka Publ., 1972, 400 p.
26. Latyshev A. N., Ovchinnikov O. V., Okhotnikov S. S., Smirnov M. S., Klyuev V. G. *Pribory i Tekhnika Eksperimenta*, 2004, no. 6, pp. 119—124.
27. Latyshev A. N., Ovchinnikov O. V., Smirnov M. S. *Kondensirovannye sredy i mezhfaznye granitsy*, 2004, vol. 6, no. 1, pp. 70—74.
28. Latyshev A. N., Ovchinnikov O. V., Evlev A. B., Utehin A. N., Smirnov M. S., Alpatova D. V., Efimova M. A., Leonova L. Yu., Kluev V. G., Kosyakova E. A., Holkina A. M., Cheryh S. V. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedenii. Fizika*, 2006, vol. 49, no. 10, Prilozhenie, p. 258—261.
29. Ovchinnikov O. V., Kosyakova E. A., Leonova L. Yu., Smirnov M. S., Evlev A. B., Latyshev A. N., Utekhin A. N. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedenii. Fizika*, 2008, vol. 51, no. 3, pp. 21—26.
30. Ovchinnikov O. V., Smirnov M. S., Latyshev A. N., Leonova L. Yu., Kosyakova E. A., Klyuev V. G., Tat'yanina E. P. *Kvantovaya elektronika*, 2010, vol. 40, no. 6, pp. 490—494.
31. Ovchinnikov O. V., Latyshev A. N., Smirnov M. S., Kvashnina N. V., Shatskikh T. S. *Optika i spektroskopiya*, 2013, vol. 114, no. 4, pp. 603—612.
32. Ovchinnikov O. V., Smirnov M. S., Kosyakova E. A., Latyshev A. N., Klyuev V. G., Evlev A. B., Utekhin A. N., Aseeva D. V. *Fizik i tekhnika poluprovodnikov*, 2009, vol. 43, vyp. 3, pp. 364—368.

Ефимова Марина Анатольевна — к. ф.-м. н., доцент кафедры естественно-научных дисциплин, Международный институт компьютерных технологий; тел.: +7 (473) 2210069, e-mail: marinaefimova@rambler.ru

Митрохин Виктор Иванович — д. ф.-м. н., профессор кафедры полупроводниковой электроники и нанoeлектроники, Воронежский государственный технический университет; тел.: +7 (473) 2437695, e-mail: mitro4@yandex.ru

Чаплыгин Андрей Владимирович — к. ф.-м. н., доцент кафедры естественно-научных дисциплин, Международный институт компьютерных технологий; тел.: +7 (473) 2210069, e-mail: avchapl@mail.ru

Ефимова Марина А. — Cand. Sci. (Phys.-Math.), Associate Professor, Department of Natural Science Disciplines, International Institute of Computer Technologies; ph.: +7 (473) 2210069, e-mail: marinaefimova@rambler.ru

Митрохин Виктор И. — Dr. Sci. (Phys.-Math.), Professor of Semiconductor Electronics and Nanoelectronics Department, Voronezh State Technical University; ph.: +7 (473) 2437695, e-mail: mitro4@yandex.ru

Chaplygin Andrey V. — Cand. Sci. (Phys.-Math.), Associate Professor, Department of Natural Science Disciplines, International Institute of Computer Technologies; ph.: +7 (473) 2210069, e-mail: avchapl@mail.ru