

Стекла, ослабляющие электромагнитное излучение

Павлушкина Т.К. канд. техн. наук, Бабинова А.А.

АО «Институт стекла», Россия, г. Москва

Аннотация

Разработано радиопоглощающее стекло, прозрачное в видимой области спектра. Радиозащитный эффект получен путем имплантации в поверхностный слой стекла, не превышающий 100 нм ускоренных ионов переходных элементов, образующих в стекле наночастицы, поглощающие электромагнитное излучение.

Имплантацию ионами проводили при энергии $E = 150$ кэВ и потоках (F) меняющихся в диапазоне от $2 \cdot 10^{15}$ до $5 \cdot 10^{17}$ ионов/см².

Обнаружено, что при имплантации до доз $F \leq 10^{16}$ см⁻² все переходные элементы входят в стекло преимущественно в изолированном состоянии и валентных формах, типичных для них при введении в оксидные стекла через шихту. Увеличение дозы (от 10^{16} до $6 \cdot 10^{16}$) приводит к тому, что изолированные ионы начинают агрегироваться в кластеры, связанные сильными спин-спиновыми взаимодействиями

Измерения поглощения электромагнитного излучения имплантированными модельными и листовыми стеклами показало, что ослабление мощности ЭМИ находится в пределах 6,2-30,2 дБ для фосфатного стекла и 7,8-34,1 дБ для силикатных стекол. Наибольший радиозащитный эффект наблюдается на стеклах, имплантированных никелем (Ni^+) и кобальтом (Co^+). Степень поглощения ЭМИ можно увеличить до 37,5 дБ путем проведения термообработки.

Ключевые слова: электромагнитное излучение, оксиды переходных элементов, электронный парамагнитный резонанс, имплантация ионов, фосфатное и силикатное стекло, светопропускание стекол, наночастицы, радиопоглощение.

Abstract

A radio-absorbing glass that is transparent in the visible range of the spectrum has been developed. The radiation protection effect was obtained by implanting accelerated transition element ions in the glass surface layer that does not exceed 100 nm. These ions form nanoparticles in the glass that absorb electromagnetic radiation.

Ion implantation was performed at an energy $E = 150$ Kev and fluxes (F) varying in the range from $2 \cdot 10^{15}$ to $5 \cdot 10^{17}$ ions/cm².

When implanting doses of $F \leq 10^{16} \text{ cm}^2$ all transition elements enter the glass mainly in an isolated state and in the valence forms characteristic of them when introduced into oxide glasses through the initial mixture of all components. Increasing the dose (from 10^{16} to $6,10^{16}$) causes isolated ions to begin to aggregate into clusters linked by strong spin-spin interactions

Measurements of the absorption of electromagnetic radiation by implanted model and sheet glasses showed that The EMR power attenuation is in the range of 6,2-30,2 dB for phosphate glass and 7,8-34,1 dB for silicate glasses. The greatest radiation protection effect is observed on glasses implanted with Nickel (Ni+) and cobalt (Co+). The EMR absorption rate can be increased to 37,5 dB by heat treatment.

Keywords: *electromagnetic radiation, transition element oxides, electron paramagnetic resonance, ion implantation, phosphate and silicate glass, светопропускание стекол, nanoparticles, radio absorption.*

Воздействие электромагнитного излучения различной природы на технические и биологические объекты является существенным фактором, влияющим на их функционирование. Поскольку в настоящее время значительно возросло количество разнообразных источников электромагнитного излучения - ЭМИ (радио, телевидение, мониторы персональных компьютеров, радиотелефоны, навигационные приборы и т.д.) и расширяется используемый частотный диапазон, то весьма актуальными являются проблемы защиты от воздействия электромагнитных сигналов в широкой полосе частот.

Разработка систем защиты, экранирования и поглощения широкополосного ЭМИ является довольно сложной задачей, как с теоретической, так и с практической точки зрения. Жесткие технические требования к таким системам обуславливают необходимость поиска комплексных решений задачи защиты от ЭМИ, а также защиты информации, содержащейся в ЭМИ.

В последнее время значительный интерес вызывают проблемы, связанные с освоением нанометровых размеров элементов техники различного назначения.

Частицы нанометрового размера, внедренные в то или иное вещество, обнаруживают свойства, значительно отличающиеся от свойств исходного материала, и представляют интерес для многочисленных практических применений (в оптике, микромеханической области, в схемах памяти магнитной информации и др.).

Одним из методов, используемых для создания коллоидных металлических наночастиц в диэлектриках, является ионная имплантация. Ионной имплантацией называется процесс внедрения в мишень ионизированных атомов с энергией, достаточной для проникновения в ее приповерхностные области.

В процессе ионной имплантации поверхность твердого тела (подложки) облучается тяжелыми заряженными частицами (ионами), ускоренными до энергии от нескольких килоэлектронвольт до нескольких мегаэлектронвольт, при этом происходит частичное распыление подложки с внедрением (имплантацией) в нее ускоренных ионов что позволит получить высокую плотность наночастиц размером 10-50 нм в тонком поверхностном слое стекла, и приведет к поглощению электромагнитного излучения мм и см диапазонов за счет рассеяния и отражения на наночастицах, т.е. созданию радиозащитного эффекта.

Существующие радиозащитные стекла имеют существенный недостаток – окрашенные в массу стекла, содержащие 20-25 масс. % оксидов железа и до 1-6 масс. % оксидов кобальта, титана или ванадия, снижают светопропускание в видимой области спектра и не предназначены для остекления зданий. Листовое стекло, армированное металлической сеткой с малыми размерами ячеек, не может быть использовано для остекления жилых и общественных зданий.

В связи с этим нами разработана технология получения прозрачных радиозащитных материалов на основе листового стекла путем ионной имплантации переходных элементов в его поверхностный слой.

Выбор импланта и оптимальную дозу облучения предполагается проводить на модельных стеклах, синтезированных из химически чистых реактивов во избежание попадания в стекломассу примесных ионов, способных взаимодействовать с имплантированными ионами переходных элементов.

Идентификацию соединений, образующихся в стекле после имплантации, проводили с помощью метода электронного парамагнитного резонанса, который, кроме того, позволяет исследовать эволюцию состояний ПМ в процессе ионной имплантации, в частности образование кластеров ПМ, предшествующих возникновению наночастиц.

Нами выбран состав модельного силикатного стекла (S-1) близкий к составу листового оконного и имеющего более низкие температуры варки и осветления, легко синтезируемый в лабораторной электропечи и полностью провариваемый при температурах 1490-1520°C.

Второй модельный состав стекла выбран на фосфатной основе (P-1).

Известно, что сетка фосфатного стекла менее прочна и более подвижна, чем у силикатного, что подтверждается их низкой температурой размягчения и быстрым изменением вязкости в зависимости от температуры в зоне размягчения.

При действии высокочастотного электромагнитного поля на подобные стекла возрастают потери энергии за счет деформации отдельных участков структурной сетки стекла, характеризующихся менее прочной связью Р-О, поэтому неактивированные фосфатные стекла должны поглощать больше электромагнитной энергии в сравнении с неактивированными силикатными стеклами.

Синтезированные стекла имеют следующий молярный химический состав в масс. %: $64\text{SiO}_2 - 2\text{Al}_2\text{O}_3 - 15\text{Na}_2\text{O} - 5\text{MgO} - 10\text{CaO} - 4\text{B}_2\text{O}_3$ (состав S-1) и $65\text{P}_2\text{O}_5 - 10\text{B}_2\text{O}_3 - 10\text{Al}_2\text{O}_3 - 15\text{MgO}$ (состав P-1).

Из отожженных образцов стекол методом шлифовки и полировки изготавливали пластины размером 20x20x4 мм, 30x30x4 мм, 10x10x0,5 мм, 10x20x0,5 мм и 20x20x1 мм.

Выбор оптимальных видов имплантов, пригодных для создания в стеклах радиозащитного эффекта

Исследовались многокомпонентные эталонные стекла на силикатной и фосфатной основе, имплантированные переходными элементами Ti, V, Cr, Mn, Co, Fe, Ni, Cu, W и Mo. Ионную имплантацию выполняли при следующих условиях: энергия $E = 150$ кэВ; поток F_v в диапазоне от $2 \cdot 10^{15}$ до $5 \cdot 10^{17}$ ионов/см²; плотность потока $j = 0,5 - 1$ мкА/см². мкА с целью уменьшения температуры разогрева пластины стекла в процессе имплантации, при этом температура на его поверхности не превышала 70-80°C.

Нами установлено, что при имплантации до доз $F \leq 10^{16}$ см⁻² все эти элементы входят в стекло в изолированном состоянии и валентных формах, типичных для этих элементов, введенных в оксидные стекла в небольших количествах вместе с шихтой с последующим плавлением стекломассы.

Так, ион Ti^{3+} дает спектр ЭПР при комнатной температуре, представляющий собой синглетную асимметричную линию с $g=1,92-1,93$. Она принадлежит иону Ti^{3+} в тетрагонально сжатом октаэдре.

Ион V^{4+} обнаруживает в имплантированных стеклах спектр сложной формы, обусловленной наличием анизотропной сверхтонкой структуры из-за взаимодействия неспаренного электрона с ядром ^{51}V . Установлено, что V^{4+} образует в стеклах ион ванадила VO^{2+} , при этом V^{4+} находится в искаженном октаэдре. Симметрия комплекса C_{4v} , а основное состояние ванадия - $|xy\rangle$.

Спектр ЭПР Cr^{3+} при комнатной температуре состоит из интенсивной линии с $g \sim 5,3$ и более слабой линии с $g = 1,985$. С увеличением имплантационной дозы интенсивность линии с $g \sim 5,3$ уменьшается, тогда как вторая линия возрастает по величине. Линия с $g \sim 5,3$ может быть приписана изолированным ионам Cr^{3+} . Линию с $g = 1,985$ обычно относят к кластерам Cr^{3+} .

Ион Co^{2+} в имплантированных стеклах обычно находится в октаэдрическом окружении, обнаруживая линию ЭПР вблизи $g = 4,3$, при этом ион Co^{2+} характеризуется короткими временами спин-решеточной релаксации, и сигнал ЭПР наблюдается только при температурах жидкого гелия. В силикатных стеклах спектр Co^{2+} наблюдался при 4,2 К в виде широкой ($\Delta H \approx 80$ мТ) синглетной асимметричной линии с $g_{\text{эфф}} \approx 4,2$.

Спектр Cu^{2+} в имплантированных стеклах надежно идентифицируется при комнатной температуре и характеризуется анизотропной четырехкомпонентной сверхтонкой структурой, отвечающей спину $I = 3/2$ двух магнитных изотопов $^{63,65}\text{Cu}$. Спектры Cu^{2+} в стеклах описываются спин-гамилтонианом аксиальной симметрии с $S = 1/2$ и $I = 3/2$. Ион Cu^{2+} находится в центре октаэдра, вытянутого вдоль тетрагональной оси.

Спектр ЭПР W^{5+} в имплантированных вольфрамом силикатных стеклах состоит из слабо асимметричной линии с $g_{||} = 1,702$ и $g_{\perp} = 1,766$ аналогичен спектрам, наблюдаемым в других оксидных стеклах (см. рис.1). Ион W^{5+} находится в тетрагонально сжатом октаэдре.

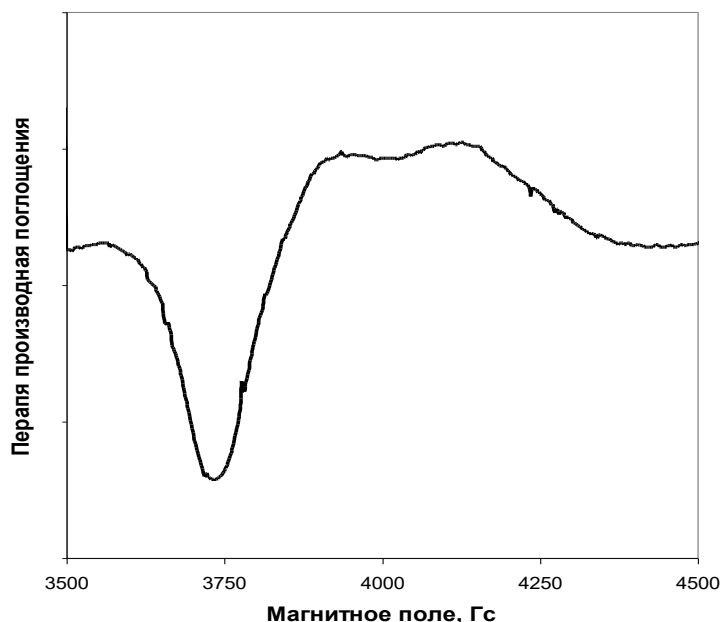


Рис.1. Спектр ЭПР W^{5+} в оксидных стеклах

Анализ полученных экспериментальных данных показал, что в интервале доз от 10^{16} до $6 \cdot 10^{16}$ происходят существенные изменения в спектрах ЭПР. Вместо сложных спектров с СТС в случае V^{4+} , Mn^{2+} , Cu^{2+} ,

Mo^{5+} или анизотропных линий наблюдаются одиночные практически симметричные линии, которые являются следствием образования кластеров этих ионов, связанных обменными взаимодействиями. Именно эти кластеры являются предшественниками последующего образования наночастиц.

При дозах $F \geq 10^{16} \text{ см}^{-2}$, как отмечалось выше, возможно образования трех групп наночастиц в стеклах, подвергнутых ионной бомбардировке: металлические коллоидные частицы, оксиды ПМ и композиты, включающие в себя ПМ и элементы сетки стекла или два типа ПМ.

В фосфатных стеклах, имплантированных V^+ при потоках $F > 1 \cdot 10^{17} \text{ см}^{-2}$ синглетная линия с $g \sim 1,96$ наблюдаемая при комнатной температуре обнаруживает аномальную температурную зависимость, выражающуюся в резком перегибе этой зависимости в области $\sim 350 \text{ К}$, что свидетельствует о существовании фазового перехода. Известно, что кристаллы VO_2 обнаруживает переход металл – изолятор при $\sim 340 \text{ К}$. Это первый пример образования микрокристаллических оксидов при имплантации ванадия в оксидное стекло.

Температурная зависимость интенсивности и ширины линии с $g = 1,985$ для силикатного стекла, имплантированного Cr^+ при дозе $D = 3 \cdot 10^{17} \text{ см}^{-2}$, также является необычной для парамагнетиков. Интенсивность линии сначала возрастает с понижением температуры от 473 до 325 К , и затем резко уменьшается ниже 315 К . Ширина линии постоянно выше 320 К , но начинает резко возрастать в интервале от 315 до 305 К . Наблюдаемая зависимость интенсивности и ширины этой линии имеет указывает на фазовый переход.

Другой оксид хрома образуется в силикатном стекле, облученном при $D \geq 5 \cdot 10^{17} \text{ см}^{-2}$. При 360 К в этом стекле появляется еще одна линия с $g \sim 1,98$. Ниже 300 К на этой линии появляется плечо со стороны низких полей, которой сдвигается в сторону еще более низких полей при понижении температуры. Эта линия зависит от температуры, но характер зависимости иной, чем в случае Cr_2O_3 . Появление плеча и более ассиметричная форма линии типичны для ферромагнитного резонанса (ФМР). Известно, что форма и ширина линий ФМР, связанная со случайным ансамблем ферромагнитных частиц, диспергированных в среде, почти всегда определяется магнетокристаллической анизотропией. Температурная зависимость линии ФМР приписывается температурной зависимости поля анизотропии H_a . Хорошо известно, что среди оксидов хрома только CrO_2 является ферромагнетиком при комнатной температуре (его точка Кюри $T_c = 390 \text{ К}$). Показано, что в тетрагональном CrO_2 магнетокристаллическая анизотропия является аксиальной.

Рассмотренные примеры показывают, что при высокодозовой имплантации Cr и Mn в стеклах образуются микрокристаллические оксиды этих элементов, и, наконец, образование металлических коллоидных частиц.

Синглетная линия с $g=2,22$ при комнатной температуре была обнаружена для силикатных и фосфатных стекол, имплантированным Co^+ при дозе $D > 6 \cdot 10^{16} \text{ см}^{-2}$ и термически обработанных в восстановительной атмосфере. При низких температурах в спектре силикатного стекла появляется плечо, которое сдвигается с понижением температуры в сторону низких полей. Как отмечалось выше, металлический Co является ферромагнетиком с температурой Кюри $T_c = 1388 \text{ K}$. Появление плеча связано с увеличением магнетокристаллической анизотропии, которая зависит от размера частиц. Малые ферромагнитные частицы ведут себя как суперпарамагнетики.

При определенных малых размерах они переходят в однодоменное состояние с однородной самопроизвольной намагниченностью по всему объему частицы.

Согласно данным работы [14], полученным с помощью XPS, в кварцевом стекле, имплантированном ионами W^+ при энергии $E = 200 \text{ кэВ}$, присутствуют металлический W, WO_2 и смешанные $WO-SiO_2$ оксиды. В случае силикатных стекол, имплантированных вольфрамом при высокодозовом облучении и подвергнутых термической обработке в восстановительной атмосфере, образуются частицы металлического вольфрама, размер которых зависит от имплантируемой дозы: при дозе $5 \cdot 10^{16} \text{ см}^{-2}$ наблюдаются практически сферические частицы размером $\leq 5 \text{ нм}$. При дозе 10^{17} см^{-2} размер частиц колеблется от 5 до 10 нм. На рис. 2 приведен профиль распределения вольфрама по глубине слоя. Профиль имеет почти гауссову форму с максимумом при 80 нм, сдвинутым в сторону поверхности по сравнению с элементами первого переходного ряда, так как W - более тяжелый элемент.

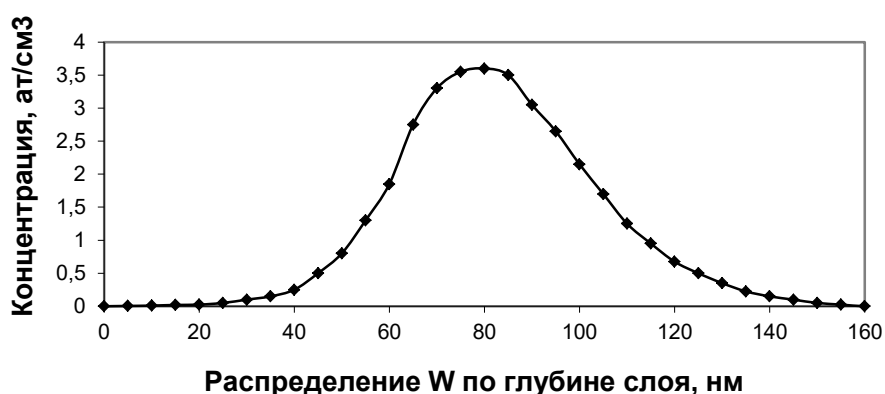


Рис.2. Распределение вольфрама по глубине слоя для стекла S-1, имплантированного W^+ до дозы $5 \cdot 10^{16} \text{ см}^{-2}$.

Измерения поглощения электромагнитного излучения 3-см диапазона проводились с использованием волноводного тракта радиоспектрометра РЭ-1306. Источником излучения служил клистронный генератор мощностью 50 мВт, на выходе которого стоял аттенюатор, позволявший регулировать выходящую мощность в широких пределах. Далее шла система волноводов, подводящая сигнал к детекторной секции, соединенной с миллиамперметром, измеряющим выпрямленный детектором ток, пропорциональный мощности. Исследуемый образец стекла зажимался фланцами двух отрезков волноводном тракте.

Измерения величины поглощения электромагнитного излучения (дБ) имплантированными стеклами, показало, что наиболее эффективными являются силикатные составы, где стеклообразующую роль играет оксид кремния, состав S-1. Полученные нами экспериментальные результаты приведены в табл. 1.

Таблица 1

Ослабление мощности электромагнитного излучения при длине волны 3 см стеклами, имплантированными переходными элементами

№№ пп	Имплант	Ослабление мощности излучения, дБ	
		Стекло Р-1	Стекло S-1
1.	-	3,6	2,0
2.	Титан, Ti	4,5	4,4
3.	Ванадий, V	8,4	7,8
4.	Хром, Cr	9,8	11,6
5.	Марганец, Mn	9,6	14,2
6.	Железо, Fe	20,2	28,6
7.	Кобальт, Co	28,4	32,6
8.	Никель, Ni	30,2	34,1
9.	Медь, Cu	20,3	29,6
10.	Вольфрам, W	18,6	22,8
11.	Молибден, Mo	9,7	18,4

Анализируя экспериментальные результаты, приведенные в табл. 1, видно, что стекла на силикатной основе обладают более высоким радиозащитным эффектом в отличие от стекла Р-1, где стеклообразователем является пентоксид фосфора.

Наибольшее ослабление электромагнитного излучения наблюдается в имплантированном стекле S-1, содержащем металлические коллоидные

частицы размером порядка 5 нм и однородным по своей величине в отличие от образующихся композитов переходных металлов и оксидов. Наиболее высокое поглощение электромагнитного излучения наблюдается в случае выделения в поверхностном слое ферромагнитных металлических наночастиц кобальта и никеля.

Существенным моментом при разработке радиозащитных стекол является сохранение их прозрачности в видимом диапазоне света. На рис 3 приведен оптический спектр поглощения оконного стекла, в которое CoO был введен через шихту в количестве 0,2 вес.% перед плавлением (спектр 1) и стекла, имплантированного Co^+ (спектр 2). Как видно из рисунка, интенсивные полосы поглощения иона Co^{2+} после высокодозовой имплантации исчезают.

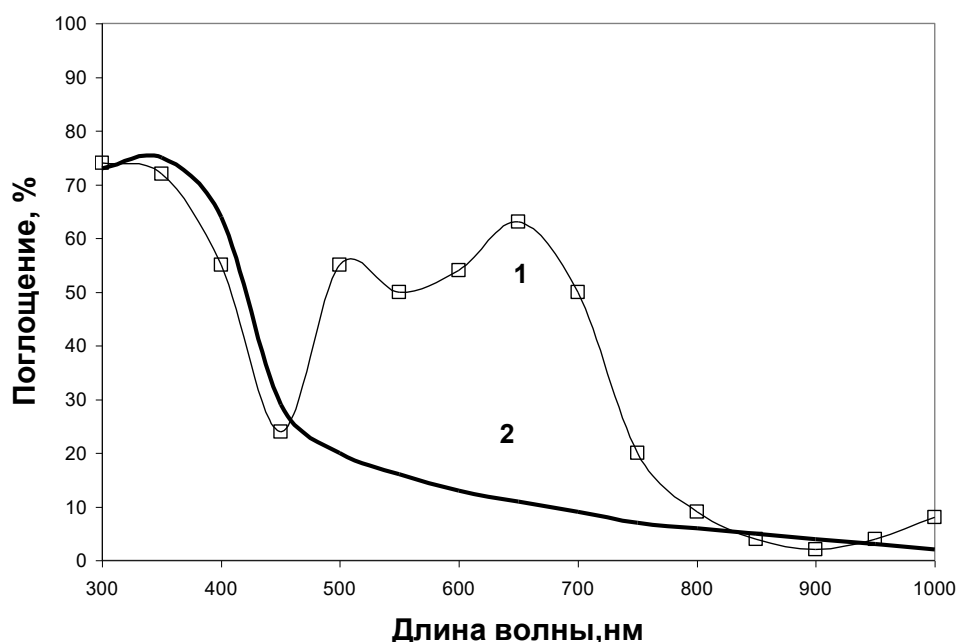


Рис.3. Спектры поглощения силикатного листового стекла, легированного CoO (1) и имплантированного ионом Co^+ при дозе $D=6 \cdot 10^{16} \text{ см}^{-2}$ (спектр 2)

Как видно из рисунка, стекло, окрашенное в массе оксидом кобальта в небольших количествах, имеет синий цвет и мало пропускает лучей видимой части спектра. Стекло, имплантированное кобальтом и содержащее в поверхностном слое коллоидные металлические наночастицы кобальта практически прозрачно в видимом диапазоне.

Приведем еще один пример, в частности для стекла, окрашенного в массе оксидом меди и имеющего голубой цвет рис. 4.

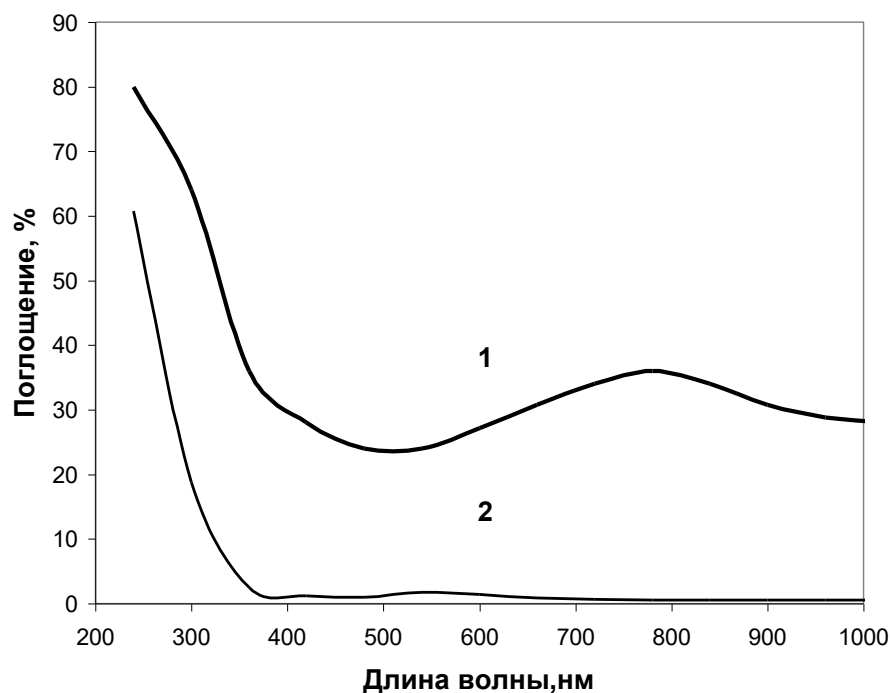


Рис. 4. Оптические спектры меди, введенной в стекломассу в количестве 0,3 масс. % CuO (спектр 1) и в листовом стекле, имплантированном медью при дозе 10^{17} см⁻² (спектр 2).

Из этого рисунка следует, что характерная для Cu^{2+} полоса поглощения в области 700-800 нм исчезает при ионной имплантации и вместо нее появляется полоса поглощения, обусловленная плазмонным резонансом, в области 540 нм. При толщине стекла 4 мм поглощение равно 1,8%.

Выводы

1. Имплантацию ионами переходных металлов проводили при энергии $E = 150$ кэВ и потоках (F) меняющихся в диапазоне от $2 \cdot 10^{15}$ до $5 \cdot 10^{17}$ ионов/см². Плотность тока выбрана порядка 0,5-5 мкА с целью уменьшения температуры разогрева пластины стекла в процессе имплантации, при этом температура на его поверхности не превышала 70-80°C.

2. В качестве имплантов выбраны следующие элементы: титан, ванадий, хром, марганец, железо, кобальт, никель, медь, вольфрам и молибден.

3. Обнаружено, что при имплантации до доз $F \leq 10^{16}$ см⁻² все переходные элементы входят в стекло преимущественно в изолированном состоянии и валентных формах, типичных для этих элементов, введенных в оксидные стекла через шихту с последующим плавлением. Увеличение дозы (от 10^{16} до $6 \cdot 10^{16}$) приводит к тому, что изолированные ионы начинают

агрегироваться в кластеры, связанные сильными спин-спиновыми взаимодействиями.

4. При высокодозовой имплантации ($F=6 \cdot 10^{16} - 10^{17} \text{ см}^{-2}$) в имплантированных стеклах образуются наночастицы (размером 5-10 нм) различного типа: оксиды (MnO , VO_2 , Cr_2O_3 , CrO_2), сложные соединения (например, Ti_xPO_4), коллоидные металлические частицы (Co , Ni , Cu , W).

5. Измерения поглощения электромагнитного излучения имплантированными модельными и листовыми стеклами показало, что ослабление мощности ЭМИ находится в пределах 6,2-30,2 дБ для фосфатного стекла и 7,8-34,1 дБ для силикатных стекол. Наибольший радиозащитный эффект наблюдается на стеклах, имплантированных никелем (Ni^+) и кобальтом (Co^+). Степень поглощения ЭМИ можно увеличить до 37,5 дБ путем проведения термообработки при 610°C в восстановительной атмосфере в водородноаргоновой среде.

6. Показано, что в стеклах, имплантированных переходными элементами, наночастицы образуются в поверхностном слое, не превышающем 110 нм, что не снижает прозрачности листового стекла в ультрафиолетовой и видимой частях спектра.

7. Разработанные нами стекла могут быть успешно использованы для остекления детских и лечебных учреждений, спортивно-оздоровительных комплексов, общественных и жилых зданий, обеспечивая защиту людей от воздействия электромагнитного излучения.

Список литературы:

1. Банный В.А. Оценка уровня электромагнитного фона и способы защиты от СВЧ-излучения. Учебно-методическое пособие ГомГМУ – 2015.
2. Дяденко М.В. Стекла радиозащитного назначения. – Стекло и керамика. - 2019. - № 7 стр. 8-14.
3. Богомолова Л.Д., Жачкин В.А. – «Парамагнитные центры в ионимплантированных неорганических стеклах» - Физ. и Хим. стекла, 1998, т.24, № 1, с-3-30.
4. Риссел Х., Руге И. Ионная имплантация: Пер. с нем. – Наука. Гл. ред. физ.-мат. лит., 1983.
5. Whichard G., Weeks R.A., Zuhr R.A. – Comparison of magnetic properties of iron and manganese ion implanted glasses - Proc. XV Intern. Congr. On Glass, Leningrad, 1989, Ed. By Mazurin O.V., L., Nauka, 1989, V. 2b, P. 271-276.
6. Яфаев Н.Р., Яблоков Ю.В. – «Электронный парамагнитный резонанс Ti^{3+} в некоторых силикатных и фосфатных стеклах» - Физика твердого тела; 1962, т.4, № 6, с. 1529-1534.
7. Гарифьянов Н.С. – «Электронный парамагнитный резонанс Cr^{5+} в стеклах» - Физика твердого тела, 1962, т. 4, № 6, с. 1962-1965.
8. Wiekman H.H., Klin M.P., Shirley D.A. – Paramagnetic resonance of Fe^{3+} in polycrystalline ferrichrome – J. Chem. Phys. 1965, V. 42, N 6, P. 2113-2117.
9. Богомолова Л.Д., Лазукин В.Н., Петровых Н.В. – «Влияние кобальта на спектры ЭПР Cu^{2+} в оксидных стеклах» – ДАН СССР, 1968, т. 181, № 2, с. 313-316.
10. Петуховская А.Г., Минск, Сборник научных работ БГТУ, 2018, ч.2, с. 342-345
11. Bogomolova L.D., Krasil'nikova N.A., Tarasova V.V. - Electron Paramagnetic Resonance of silica glasses implanted with nickel - J. Non-Cryst. Solids, 2003, V.319, N 2, p. 225-231.

12. Bortanello R., Glisenty A., Granozzi G., Battaglin G., «Study of silica glass implanted with tungsten» - J. Non-Crystalline Solids, 1993, V.162, №3, p.205-216.
13. Morishita Y., Tanaka K. – «Optical absorption in Co-doped silicate glasses» - J. Appl. Physics - V.93, №2, p.999-1003.
14. EN 572-4:2004 – Glass in building – Basic soda lime silicate glass products – Part 4: Drawn sheet glass (Стекло в строительстве – Базовые изделия из натрий-кальций-силикатного стекла – Часть 4: Тянутое листовое стекло).