

УДК 548.526:549.514.63

ОКРАШИВАНИЕ КРИСТАЛЛОВ РУТИЛА ПУТЕМ ИМПЛАНТАЦИИ ИОНОВ МАРГАНЦА, ЖЕЛЕЗА И КОБАЛЬТА

*Ю.И. Трошина, Р.И. Хайбуллин, В.В. Базаров, Р.Г. Гатиятов,
О.Н. Лопатин, А.И. Бахтин, И.Б. Хайбуллин*

Аннотация

Данная работа посвящена исследованию возможности окраски исходно-бесцветного рутила (TiO_2) путем имплантации ионов переходной группы железа в кристаллическую структуру минерала с последующей термической обработкой. Ионы Mn^+ , Fe^+ и Co^+ с энергией 40 кэВ были имплантированы в монокристаллические (100)- и (001)-пластинки TiO_2 с дозой $1.5 \cdot 10^{17}$ ион/см². После имплантации пластины приобретают темно-серую окраску с характерным металлическим блеском. Последующий термический отжиг в атмосфере воздуха ведет к восстановлению структуры и изменению цвета рутила в зависимости от внедренного химического элемента и параметров отжига. Природа наведенной окраски рутила с примесью переходных элементов была исследована методами оптической спектроскопии. Анализ оптических спектров показывает, что в случае внедренной примеси марганца или кобальта красно-оранжевая или светло-зеленая окраска рутила обусловлена изоморфным вхождением ионов Mn^{3+} или Co^{2+} в структурные позиции Ti^{4+} в матрице TiO_2 . В случае примеси железа появление желто-оранжевой окраски у рутила связано с формированием в облученном слое минерала мелкодисперсной фазы гематита (Fe_2O_3).

Введение

Благодаря своим уникальным оптическим свойствам (высокий показатель преломления и дисперсия) монокристаллы синтетического бесцветного рутила пользуются большой популярностью в ювелирной промышленности. Немаловажным фактором является возможность окрашивания природных бесцветных минералов или их синтетических аналогов с целью получения новой гаммы цветов драгоценных камней. В настоящее время в качестве одного из перспективных способов окрашивания рассматривается метод ионно-лучевого легирования, когда в кристаллическую структуру минерала имплантируются ионы-хромофоры с заданной концентрацией, что в сочетании с последующим термическим отжигом позволяет в некоторых случаях придать кристаллу определенный цвет [1–5]. Однако, насколько нам известно, исследования, целенаправленные на получение желаемой окраски в исходно бесцветном рутиле с использованием метода ионной имплантации, не проводились.

В данной работе описаны результаты проведенных экспериментов по окрашиванию монокристаллических (100)- и (001)-пластинок рутила в различные цветовые тона путем имплантации ионов переходной группы железа Mn, Fe и Co с последующей термической обработкой. Природа наведенной светло-зеле-

ной и желто-оранжевой окраски рутила исследуется методами оптической абсорбционной и отражательной спектроскопии.

1. Экспериментальная часть

Монокристаллические пластинки синтетического рутила с различной кристаллографической ориентацией были облучены высокоэнергетичными ионами переходной группы железа: Mn, Fe и Co. А именно, облучение (100)- и (001)-пластинок TiO_2 осуществлялось с энергией 40 кэВ, дозой $1.5 \cdot 10^{17}$ ион/см² при плотности ионного тока 8 мкА/см² на ионно-лучевом ускорителе ИЛУ-3.

Согласно расчетам, выполненным по компьютерной программе SRIM-2003 [6], при данных режимах имплантации средний пробег ионов группы железа в матрице TiO_2 ($\rho = 4.24$ г/см³) составляет величину $R_p = 20 \div 25$ нм и основная часть (порядка 98%) внедренной примеси железа сосредоточена в тонком приповерхностном слое толщиной около 50 нм. Следует отметить, что процесс торможения высокоэнергетичных ионов в твердом теле порождает каскад выбитых или смещенных атомов самой подложки и, зачастую, при высоких значениях дозы облучения приводит к структурной аморфизации приповерхностных слоев монокристаллических подложек. Требуется последующая постимплантационная термическая обработка облученной матрицы для отжига радиационных дефектов, рекристаллизации структуры, разгона внедренной примеси по всему кристаллу и ее химической и (или) электрической активаций.

Последующая термическая обработка имплантированных образцов рутила проводилась в муфельной печи в атмосфере воздуха при различной продолжительности (15 и 60 минут) и температуре отжига (500°C или 950°C). Так, пластинки, имплантированные ионами Co и Mn, были отожжены при температуре 950°C в течение часа. Для пластинок, имплантированных ионами Fe, использовалось два режима отжига: при температуре 950°C в течение часа и при температуре 500°C в течение 15 минут. Оптические спектры пропускания и отражения были записаны в видимом диапазоне длин волн света на спектрофотометре Hitachi-330.

2. Результаты и их обсуждение

2.1. Влияние ионной имплантации и режимов последующего термического отжига на окраску пластинок рутила. Высокодозная имплантация переходных элементов с последующей термической обработкой приводят к существенному изменению цветовых характеристик рутила. В результате ионного облучения исходно бесцветные пластинки синтетического рутила приобретают темно-серый оттенок. При этом приповерхностные слои образцов TiO_2 проявляют четко выраженный металлический блеск. Порождаемые имплантацией радиационные дефекты различного структурного вида обуславливают интенсивное поглощение света во всем видимом диапазоне, что приводит к почернению и потере прозрачности имплантированных слоев облученной матрицы. Восстановление кристаллической структуры имплантированных пластинок рутила происходит при высокотемпературном отжиге образцов на воздухе, вследствие чего образцы вновь становятся прозрачными и окрашиваются в

светло-зеленые или оранжевые тона. Установлено, что изменение окраски рутила существенно зависит от химического типа имплантата, кристаллографической ориентации пластинок TiO_2 , а также от режима термического отжига. Так, (100)- и (001)-пластинки рутила, облученные ионами Co , после термического отжига при температуре $T_a = 950^\circ\text{C}$ в течение 60 минут приобретают светло-зеленую и оранжевую окраску соответственно. Отжиг пластинок рутила с примесью Mn при аналогичных режимах ($T_a = 950^\circ\text{C}$, 60 мин.) ведет к изменению окраски кристаллов к красно-оранжевым тонам. Однако в этом случае наведенная окраска пластинок рутила не зависит от их кристаллографической ориентации. Окраска кристаллов рутила с примесью Fe также не зависит от ориентации пластин, но существенно зависит от режимов термической обработки. После отжига при $T_a = 950^\circ\text{C}$ в течение 15 минут образцы рутила с примесью Fe приобретают желто-оранжевую окраску, а после высокотемпературного продолжительного отжига ($T_a = 950^\circ\text{C}$, 60 мин.) окраска изменяется к светло-зеленым тонам.

2.2. Оптические спектры исходных, имплантированных и окрашенных примесью кобальта пластинок рутила. Для исходной бесцветной пластинки рутила спектр пропускания показан на рис. 1, *a* (кривая *A*). Спектральная зависимость пропускания представляет собой практически прямую линию во всем видимом диапазоне длин волн света. Затем величина пропускания резко снижается в ультрафиолетовой области. Край оптического поглощения имеет значение $\lambda = 415$ нм, которое полностью соответствует литературным данным для монокристаллов чистого рутила при комнатной температуре.

Для спектров всех темно-серых пластинок рутила, имплантированных ионами переходной группы железа, характерной особенностью является значительное ослабление величины пропускания во всем видимом диапазоне длин волн (см. кривую *B* на рис. 1, *a* или кривые *A* и *B* на рис. 2, *a* и 3, *a* соответственно), что связано с радиационным повреждением матрицы TiO_2 [7]. Кроме этого, в спектрах пропускания рутилов, имплантированных ионами Mn , но не подвергнутых отжигу, присутствует небольшой изгиб (максимум) кривой пропускания, приходящийся на длину волны $\lambda = 550$ нм для (001)-пластинки и на $\lambda = 600$ нм для (100)-пластинки (рис. 2, *a*, кривые *A* и *B*). Также наблюдается различие в спектрах пропускания темно-серых (100)- и (001)-пластинок TiO_2 , имплантированных ионами железа. Для первой из них оптическая плотность больше на 10%, чем для второй. По-видимому, это связано с различной кристаллографической ориентацией пластин (рис. 3, *a*, кривые *A* и *B*).

Из сравнения спектров, представленных на рис. 1, *a*, видно, что прозрачность имплантированных кобальтом рутилов возрастает, а оптическое пропускание в длинноволновой (красной) области спектра возвращается к исходной величине после высокотемпературного отжига $T_a = 950^\circ\text{C}$ (рис. 1, *a*, кривые *C* и *D*). Анализ спектральной зависимости величины пропускания в окрашенных образцах показывает, что для них характерен спад пропускания в коротковолновом диапазоне длин волн от 420 до 500 нм в сравнении с пропусканием в этой области для исходной бесцветной пластинки рутила. Отметим, что сниже-

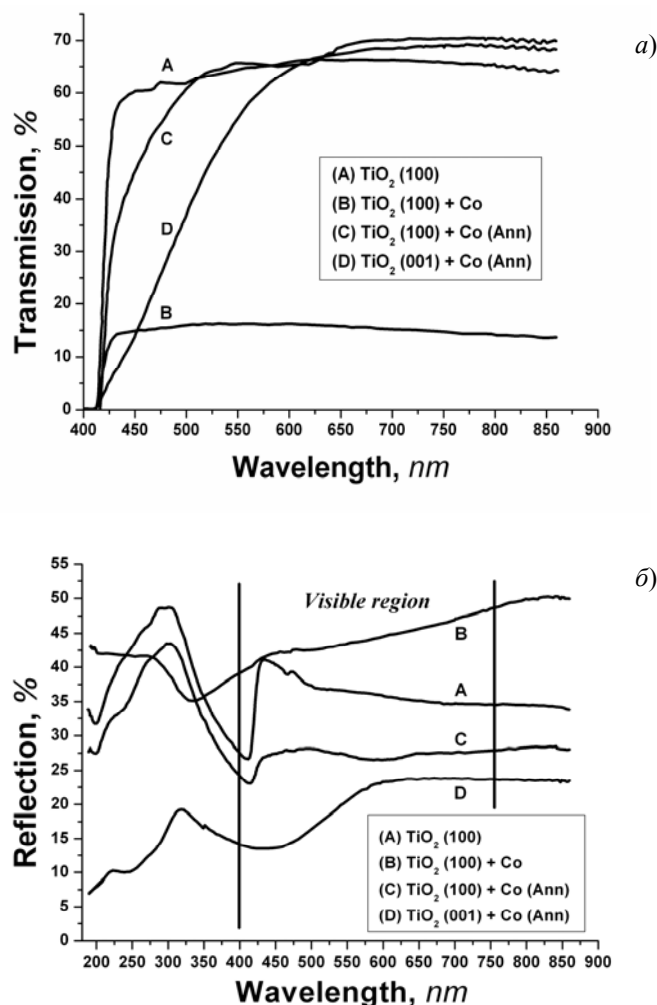


Рис. 1. Оптические спектры пропускания (а) и отражения (б) для исходной (100)-пластинки рутила (А), а также для пластинок, имплантированных ионами кобальта (В) и окрашенных в светло-зеленый (С) или оранжевый цвет (D) после отжига при $T_a = 950$ °С в течение 60 мин.

ние коротковолнового пропускания существеннее в (001)-, чем в (100)-пластинках TiO₂ (рис. 1, а, кривые D и C). Таким образом, оранжевая окраска в (001)-пластинках рутила обусловлена повышенным поглощением света в фиолетовой и зеленой спектральных областях длин волн и, соответственно, высоким значением величины пропускания в оранжево-красной области спектра. Для (100)-пластинки рутила светло-зеленая окраска связана с усилением поглощения в фиолетовой области спектра в сравнении с поглощением света в этой области для исходно бесцветных пластинок TiO₂. Помимо вышеперечисленного, в спектрах пропускания светло-зеленых пластинок рутила наблюдается ряд дополнительных слабых полос селективного поглощения, лежащих в длинноволновом

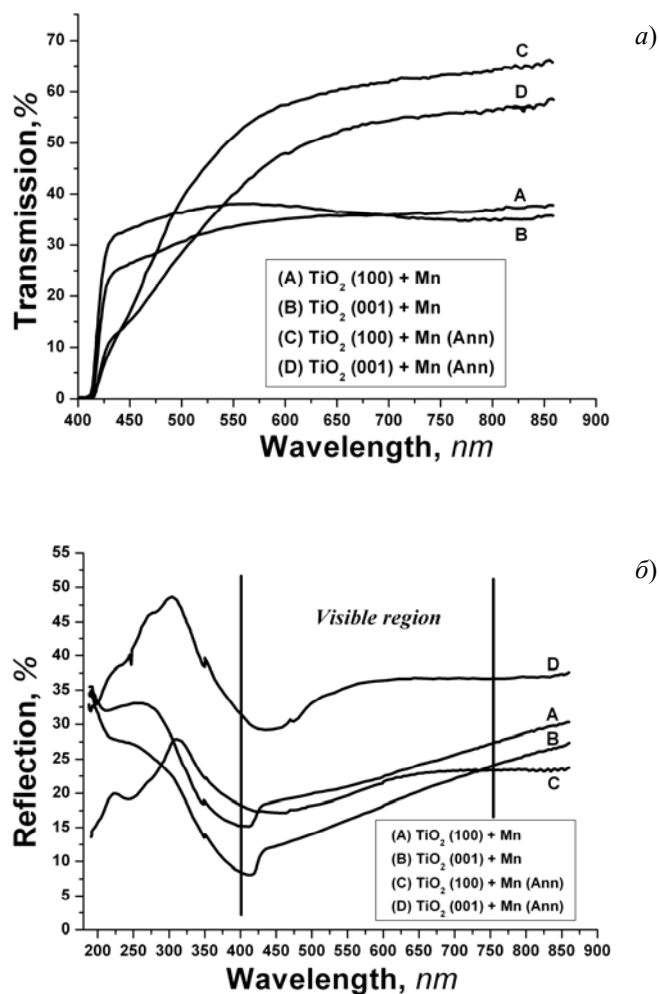


Рис. 2. Оптические спектры пропускания (а) и отражения (б) для (100)- и (001)-пластинок рутила, имплантированных ионами марганца (кривые А и В) и окрашенных в красно-оранжевые тона после отжига при $T_a = 950$ °С в течение 60 мин. (кривые С и D)

диапазоне длин волн от 550 до 650 нм, которые из-за малой интенсивности не оказывают существенного влияния на окраску кристалла.

Оптические спектры отражения исходных, имплантированных и окрашенных образцов рутила при нормальном падении света ($\lambda = 200 \div 860$ нм), приведены на рис. 1, б. В исходно бесцветном образце TiO₂ величина отражения практически постоянна в видимой области спектра (рис. 1, б, кривая А) и имеет значение порядка 40%, что обусловлено высоким значением показателя преломления рутила ($n \cong 2.6$) в видимом диапазоне длин волн света. Как и ожидалось, спектральная зависимость отражения имеет характерную точку перегиба в области $\lambda \sim 400$ нм и пик в величине отражения, приходящийся на длину волны $\lambda \sim 300$ нм, которые связаны с краем оптического и фундаментального поглощения света в рутиле соответственно. Имплантация ионов кобальта в рутил

приводит к росту величины отражения с увеличением дозы облучения, вплоть до 50%. При этом вид спектральной зависимости величины отражения изменяется, а именно наблюдается значительное усиление величины отражения света в ближней ИК области, что, по-видимому, связано как с возрастанием величины поглощения света на кислородных вакансиях, так и с ростом содержания металлического кобальта в облученном приповерхностном слое рутила. Спектральные зависимости величины отражения света для окрашенных светло-зеленых (100)- и оранжевых (001)-пластинок рутила представлена на рис. 1, б кривыми *C* и *D* соответственно. Как видно, характерной особенностью для спектров окрашенных образцов рутила является возрастание величины отражения в видимом диапазоне длин волн. В частности, в (100)-пластинках рутила наиболее интенсивно отражение, приходящееся на зеленый диапазон длин волн света (рис. 1, б, кривая *C*). Напротив, для (001)-образцов TiO_2 значительно возросло отражение в красной области света. Именно наблюдаемый рост отражения, максимумы которого приходятся либо на сине-зеленую, либо на оранжево-красную область света, обуславливает соответствующую окраску таких пластинок рутила. Важно отметить, что спектры отражения окрашенных кобальтом образцов рутила, регистрируемые как с прямой (имплантированной) так и с обратной сторон пластинки, полностью идентичны друг другу. При этом конфигурация спектров окрашенных образцов существенно отличается от спектральной зависимости величины отражения исходной пластинки рутила (ср. кривые *C* и *D* с кривой *A* на рис. 1, б). Этот экспериментальный факт указывает на то, что в результате продолжительного высокотемпературного отжига примесь кобальта, внедренная изначально в приповерхностный слой минерала, диффундирует в объем матрицы TiO_2 и, тем самым, обуславливает однородную, в целом, окраску пластинки рутила.

2.3. Оптические спектры пластинок рутила, окрашенных примесью марганца. Для рутилов, имплантированных марганцем и окрашенных после температурной обработки $T_a = 950$ °C в красно-оранжевые тона, оптические спектры пропускания представлены на рис. 2, а. Согласно полученным спектрам величина пропускания света в окрашенных образцах рутила с примесью марганца значительно понижена в фиолетово-зеленой области спектра по сравнению с пропусканием исходных пластинок рутила, чем и объясняется изменение цвета. Необходимо отметить влияние кристаллографической ориентации пластинок рутила с данной примесью на коэффициент пропускания света. Для (001)-пластинки величина пропускания имеет меньшее значение, чем для (100)-пластинки, что приводит к более насыщенному цвету первой из них. Также в спектральной зависимости пропускания оранжевых пластинок рутила наблюдается особенность, проявляющаяся в наличии точки перегиба для кривой пропускания при $\lambda = 450$ нм (рис. 2, а, кривые *C* и *D*).

В оптических спектрах отражения отожженных пластинок рутила с примесью марганца наблюдается повышенное значение величины отражения в длинноволновой области спектра, что обуславливает соответствующую им оранжево-красную окраску (рис. 2, б, кривые *C* и *D*). Более того, спектры отражения, регистрируемые как с имплантированной, так и обратной сторон пластинки,

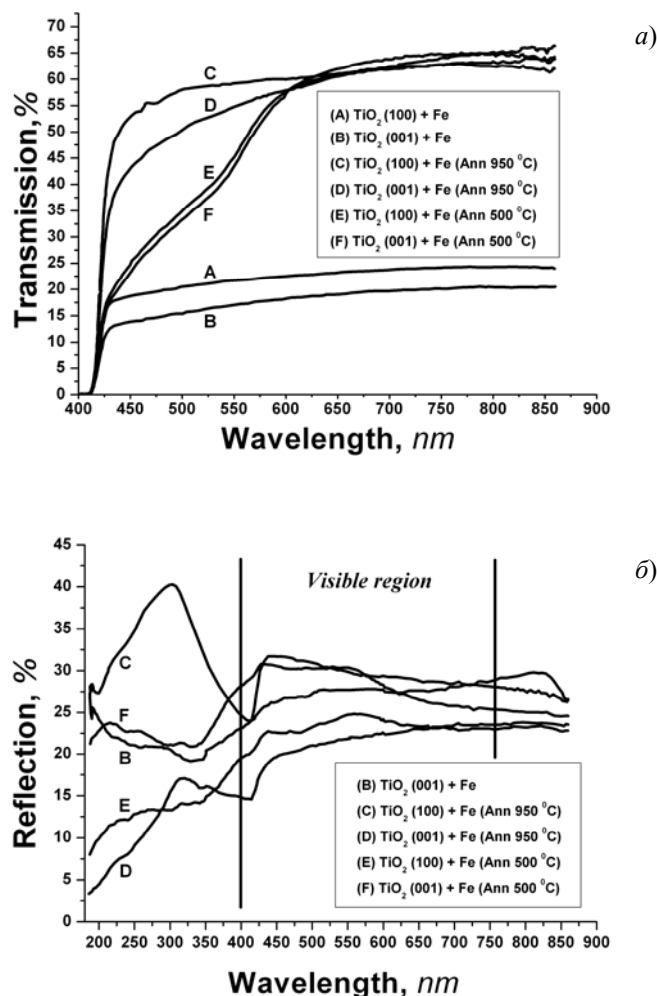


Рис. 3. Оптические спектры пропускания (а) и отражения (б) для (100)- и (001)-пластинок рутила, имплантированных ионами железа (кривые А и В) и окрашенных в зеленые (кривые С и D) или желто-оранжевые (кривые Е и F) тона после термического отжига при $T_a = 950^\circ\text{C}$ (60 мин.) или 500°C (15 мин.) соответственно

являются подобными друг другу, что свидетельствует об однородной окраске марганецсодержащих образцов рутила.

2.4. Оптические спектры пластинок рутила, окрашенных ионами железа. Влияние параметров постимплантационной термической обработки на оптические свойства железосодержащих пластинок рутила показано на рис. 3, а. В спектрах пропускания светло-зеленых образцов ($T_a = 950^\circ\text{C}$, 60 мин.) наблюдается слабое поглощение света в фиолетовом диапазоне длин волн (рис. 3, а, кривые С и D). Для желто-оранжевых образцов ($T_a = 950^\circ\text{C}$, 15 мин.) характерно значительное снижение коэффициента пропускания не только в фиолетовой, но и в зеленой областях спектра (рис. 3, а, кривые Е и F). Помимо пере-

численных выше изменений, у желто-оранжевых пластинок имеются особенности, проявляющиеся в наличии точек перегиба на кривых пропускания при $\lambda = 475$ и $\lambda = 525$ нм (рис. 3, *a*, кривые *E* и *F*), подобно окрашенным рутилам, содержащим примесь марганца.

Спектральные зависимости для величины отражения в окрашенных железом образцах рутила представлены на рис. 3, *б* (кривые *C*, *D*, *E* и *F*). Помимо характерных для всех образцов рутила пиков в ультрафиолетовой области спектра, для светло-зеленых пластинок с примесью железа наблюдается повышенное значение коэффициента отражения в сине-зеленом диапазоне в сравнении с величиной отражения для красного диапазона длин волн света (рис. 3, *б*, кривые *C* и *D*). Напротив, для оранжевых образцов, окрашенных посредством короткого низкотемпературного отжига при $T_a = 500$ °С, доминирует отражение в красном диапазоне длин волн света (рис. 3, *б*, кривые *E* и *F*). Кроме этого, спектры отражения для оранжевых железосодержащих рутилов, регистрируемые с обратной стороны пластины (в отличие от спектров отражения рутилов, окрашенных примесью кобальта или марганца), совпадают по конфигурации со спектром исходной пластинки, что свидетельствует об аллохроматической (неоднородной по объему) окраске рутила.

2.5. Природа окраски имплантированных пластинок рутила. В исследованных нами образцах рутила, имплантированного ионами группы железа, как показывают оптические спектры, главными механизмами формирования окраски являются следующие:

- перенос заряда (или валентного электрона) с лиганда на металл или с металла на металл с изменением их валентности;
- образование частиц новой фазы.

Наведенную после высокотемпературного отжига ($T_a = 950$ °С) однородную красно-оранжевую или светло-зеленую окраску рутила с примесью переходных элементов мы связываем с механизмом переноса заряда с лиганда на металл или с металла на металл с изменением их валентности. В матрице рутила (TiO_2) для процессов, связанных с переносом заряда с лиганда (O^{2-}) на металлический ион Co^{2+} (Mn^{3+} , Fe^{3+}) или с переносом электрона с одного металлического иона Co^{2+} (Mn^{3+} , Fe^{3+}) на соседний ион Ti^{3+} , характерными являются полосы поглощения света, лежащие в диапазоне длин волн $\lambda_{\text{abs}} \approx 300 \div 500$ нм [8–10]. Действительно, в спектрах пропускания окрашенных рутилов, содержащих в качестве примеси ионы кобальта, марганца или железа (рис. 1, *a* – 3, *a*, кривые *C* и *D*), наблюдаются полосы поглощения света в указанном фиолетово-зеленом диапазоне длин волн. Таким образом, анализ оптических спектров указывает на то, что высокотемпературный отжиг имплантированных рутилов приводит к изоморфному вхождению ионов примеси: Co^{2+} , Mn^{3+} (или Mn^{4+}) и Fe^{3+} в структурные позиции титана в матрице TiO_2 , и, тем самым, вызывает изменение окраски рутила в светло-зеленые или красно-оранжевые тона. Факт наличия парамагнитных ионов Co^{2+} и Fe^{3+} в окрашенных в результате отжига при $T_a = 950$ °С имплантированных пластинках рутила был подтвержден нами путем ЭПР измерений [11].

В результате ионной имплантации в облученном слое TiO_2 возможно формирование различных оксидов переходных металлов: Co_2O_3 , Mn_2O_3 , Fe_2O_3 или шпинелей различного вида: CoTi_2O_4 , MnTi_2O_4 и т. п. Так, появление у железосодержащих кристаллов рутила желто-оранжевой аллохроматической окраски после кратковременного термического отжига при более низких температурах $T_a = 500^\circ\text{C}$, по-видимому, связано с процессом окисления внедренной примеси железа и формированием в приповерхностном слое минерала мелкодисперсной фазы гематита (Fe_2O_3), для которого характерными также являются полосы переноса заряда лиганд-металл (рис. 3, а, кривые *E* и *F*).

Заключение

Метод ионной имплантации с последующим термическим отжигом приводит к изменению окраски исходно бесцветных монокристаллических пластинок рутила с различной кристаллографической ориентацией. В результате исследования установлены режимы имплантации и отжига, при которых происходит окрашивание образцов диоксида титана, имплантированных примесью переходной группы железа. Анализ оптических спектров пропускания и отражения показал, что наведенная однородная окраска пластинок рутила, имплантированных примесью кобальта или марганца, обусловлена изоморфным входжением ионов Co^{2+} или Mn^{3+} в структурную позицию Ti^{4+} в матрице рутила. С этим же механизмом мы связываем светло-зеленую окраску железосодержащих пластинок рутила, отожженных при $T_a = 950^\circ\text{C}$ в течение 1 часа. Появление желто-оранжевой окраски диоксида титана с примесью железа, отожженного при $T_a = 500^\circ\text{C}$ в течение 15 минут, обусловлено формированием в облученном слое минерала мелкодисперсной фазы гематита (Fe_2O_3).

Работа выполнена в рамках программы «Ведущие научные школы РФ» (проект № НШ 1904.2003.2), при поддержке РФФИ (проект № 03-05-64895), а также фонда НИОКР РТ (проект № 06-6.4-162).

Summary

J.I. Troshina, R.I. Khaibullin, V.V. Bazarov, R.G. Gatiyatov, O.N. Lopatin, A.I. Bahtin, I.B. Khaibullin. Coloration of rutile (TiO_2) by implantation with magnesium, iron and cobalt ions.

This work concerns an investigation on coloration of initially colourless monocrystalline rutile plates by means of ion implantation and subsequent thermal annealing. Monocrystalline (100)- and (001)-plates of rutile (TiO_2) were implanted by 40 keV Mn^+ , Fe^+ and Co^+ ions with the dose of $1.5 \cdot 10^{17}$ ion/cm². As-implanted samples show dark gray tone with distinctive metallic lustre. Subsequent thermal annealing of irradiated rutile in air results in structure recovery and in a color change, depending on implant and annealing temperature. The nature of rutile coloration was studied by optical spectroscopic methods in visible range of wavelengths. An appearance of optical absorption bands connected with charge-transfers $\text{O}^{2-} \rightarrow \text{Me}^n$ and $\text{Me}^n \rightarrow \text{Ti}^{3+}$ determine light-green or red-orange color of rutile implanted with transition metal ions and subsequent annealed at high temperature of 950°C . Here Me^n is Mn^{3+} , Fe^{3+} or Co^{2+} ions substituted Ti^{4+} host ions in TiO_2 matrix by isomorphic way. It is found that the annealing of Fe-implanted rutile plates at low temperature of 500°C leads to

the changes in their color to yellow-orange tones due to formation of ultra fine phase of hematite (Fe_2O_3) in near-surface layer of crystal.

Литература

1. *Saito Y., Horie H., Suganomata S.* Coloration of sapphire by Co ion implantation // Nucl. Instr. and Meth. in Phys. Research. – 1991. – V. B59/60. – P. 1173–1176.
2. *Marques C., Falcão A., Silva R.C., Alves E.* Structural and optical characterization of topaz implanted with Fe and Co ions // Nucl. Instr. and Meth. in Phys. Res. – 2002. – V. B191. – P. 204–208.
3. *Лопатин О.Н., Хайбуллин Р.И., Вагизов Ф.Г., Базаров В.В., Бахтин А.И., Хайбуллин И.Б.* Имплантация ионов железа в кристаллическую структуру природного берилла // ЗВМО. – 2001. – № 4. – С. 122–127.
4. *Лопатин О.Н., Хайбуллин Р.И., Ибрагимов Ш.З., Бахтин А.И., Хайбуллин И.Б.* Имплантация ионов железа в кристаллическую структуру природного кварца // Изв. вузов. Геология и разведка. – 2002. – № 6. – С. 35–41.
5. *Лопатин О.Н., Хайбуллин Р.И., Королев Э.А., Бахтин А.И., Хайбуллин И.Б.* Имплантация ионов марганца в кристаллическую структуру синтетического корунда // Изв. вузов. Геология и разведка. – 2005. – № 3. – С. 17–19.
6. *Ziegler J.F., Biersack J.P., Littmark U.* The stopping and range of ions in solids. – N. Y.: Pergamon Press, 1985 (SRIM-2003 software at <http://www.srim.org/>).
7. *Townsend P.D., Chandler P.J., Zhang L.* Optical effects of ion implantation. – Cambridge: Cambridge University Press, 1994. – 280 p.
8. *Марфуни А.С.* Введение в физику минералов. – М.: Недра, 1974. – 324 с.
9. *Платонов А.Н., Таран М.Н., Балицкий В.С.* Природа окраски самоцветов. – М.: Недра, 1984. – 197 с.
10. *Mardare D., Rusu G.I., Iacomi F. et al.* Chromium-doped titanium oxide thin films // Materials Science and Engineering B. – 2005. – V. 118. – P. 187–191.
11. *Khaibullin R.I., Tagirov L.R., Rameev B.Z. et al.* High Curie-temperature ferromagnetism in cobalt-implanted single-crystalline rutile // J. Phys.: Condens. Matter. – 2004. – V. 16. – P. L443–L449.

Поступила в редакцию
28.10.05

Трошина Юлиана Игоревна – студентка 4-го курса физического факультета Казанского государственного университета.

Хайбуллин Рустам Ильдусович – кандидат физико-математических наук, старший научный сотрудник Казанского физико-технического института КазНЦ РАН.

Базаров Валерий Вячеславович – кандидат физико-математических наук, научный сотрудник Казанского физико-технического института КазНЦ РАН.

Гатиятов Руслан Гумарович – студент 4-го курса физического факультета Казанского государственного университета.

Лопатин Олег Николаевич – кандидат геолого-минералогических наук, доцент кафедры минералогии и петрографии Казанского государственного университета.

E-mail: Oleg.Lopatin@ksu.ru

Бахтин Анатолий Иосифович – доктор геолого-минералогических наук, профессор, заведующий кафедрой минералогии и петрографии Казанского государственного университета.

Хайбуллин Ильдус Бариевич – доктор физико-математических наук, член-корреспондент РАН, заведующий лабораторией Казанского физико-технического института КазНЦ РАН.