

ИОННО-ЛУЧЕВАЯ МОДИФИКАЦИЯ СВОЙСТВ МИНЕРАЛОВ:  
РЕЗУЛЬТАТЫ И ПЕРСПЕКТИВЫ

**Лопатин О.Н. (Oleg.Lopatin@ksu.ru), Хайбуллин Р.И., Бахтин А.И.,  
Николаев А.Г.**

Казанское отделение. КФУ, КФТИ РАН

IONIC RAY MODIFICATION OF PROPERTIES OF MINERALS: RESULTS  
AND PROSPECTS

**Lopatin O.N. (Oleg.Lopatin@ksu.ru), Khaibullin R.I., Bakhtin A.I.,  
Nikolaev A.G.**

Kazan branch. KFU, KPTI RAS

Доклад посвящен экспериментальному изучению кристаллохимии минералов и их синтетических аналогов, свойства которых модифицированы методом ионно-лучевой обработки (высокодозной ионной имплантации).

Методика ионной имплантации подразумевает ионно-лучевую обработку поверхности вещества потоком высокоэнергетичных ионов различных химических элементов. Имплантация ускоренных до энергии 40 кэВ ионов переходных химических элементов в образцы минералов и их синтетических аналогов выполняется на ионно-лучевом ускорителе ИЛУ – 3 при комнатной температуре в остаточном вакууме  $10^{-5}$  Торр. Доза облучения обычно варьируется от  $0.1 \times 10^{17}$  до  $3.0 \times 10^{17}$  ион/см<sup>2</sup> при постоянной плотности ионного тока, порядка 10 мкА/см<sup>2</sup>. При данных режимах имплантации средний пробег ионов в матрицах большинства изученных минералов составляет 20-30 нм и большая часть внедренной примеси залегает в поверхностном слое образцов на глубине до 100 нм. Процесс торможения высокоэнергетичных ионов при высоких значениях дозы облучения приводит зачастую к полной структурной аморфизации приповерхностного слоя образцов. В связи с этим, для отжига радиационных дефектов, рекристаллизации структуры и разгона внедренной примеси по кристаллу требуется постимплантационная термическая обработка облученной минеральной матрицы.

Высокодозная имплантация ионов железа в бесцветные пластины уральского горного хрусталя и термическая обработка образцов привели к изменению окраски последних на желтовато-оранжевую. Изучение обработанных образцов методами адсорбционной оптической спектроскопии и дифференциального термомагнитного анализа позволило связать появление новообразованной окраски с наличием в образцах тонко дисперсированной фазы гематита.

Имплантация ионов марганца в кристаллы уральского кварца и пластины бесцветного синтетического корунда, и термическая обработка данных образцов привели к возникновению как у кварца, так и у корунда

стойкой розовато-коричневой окраски. Изучение имплантантов термомагнитным анализом позволило объяснить возникновение наведенной розовато-коричневой окраски образцов наличием в обработанных матрицах кварца самостоятельной ультрадисперсной парамагнитной фазы (курнакит-гаусманита). Изменение окраски корундов в процессе имплантации и отжига объясняется формированием в матрице корунда самостоятельной фазы шпинелида и вхождением ионов двухвалентного марганца в тетраэдрические позиции структуры новообразованной шпинели.

Имплантация высокоэнергетичных ионов кобальта в бесцветные пластины синтетического корунда и их постимплантационная обработка привели к изменению окраски пластин на голубую, сравнимую с таковой у природных сапфиров. Рентгендифрактометрическое изучение имплантированных и отожженных пластин голубого корунда позволило выявить в матрице новообразованную фазу шпинели, сформированной, очевидно, по эпитаксиальному механизму роста. Наведенная голубая окраска корунда объясняется электронными переходами в ионах двухвалентного кобальта, занимающих тетраэдрические позиции кристаллической структуры синтезированной в корунде шпинели.

После проведения имплантации ионов кобальта и марганца в пластины бесцветного синтетического рутила и отжига последних, препараты рутила были окрашены соответственно в оливково-зеленый, либо оранжевый цвет. Изучение обработанных рутилов методами оптико-спектроскопического микронзондирования позволило выявить изоморфное вхождение имплантированных ионов в октаэдрические позиции кристаллической структуры исходной матрицы.

Имплантация ионов железа в кристаллические матрицы бесцветного природного берилла (гошенита) и отжиг образцов привели к изменению окраски бериллов на золотистую, в англоязычной литературе характеризуемую как «goldberyl». Интерпретация оптических и гамма-резонансных спектров обработанных образцов позволила выявить изоморфное вхождение имплантированных ионов железа как в октаэдрические, так и в тетраэдрические позиции структуры минерала.

Аналогично, имплантация в структуру бесцветного берилла высокоэнергетичных ионов ванадия и постимплантационный отжиг образцов привел к радикальному изменению окраски последних на изумрудоподобную, луково-зеленую. Природа окраски имплантированных и отожженных, зеленых бериллов объясняется изовалентным изоморфизмом имплантированных ионов ванадия в октаэдрических, алюминиевых позициях кристаллической структуры минерала.

Проведена ионно-лучевая обработка природных, ограненных кристаллов алмаза легкими по массе ионами инертного химического элемента (гелия) с дозой облучения в диапазоне от  $0.2 \times 10^{16}$  –  $2.0 \times 10^{17}$  ион/см<sup>2</sup>. В зависимости от режимов имплантации, алмазы приобрели желтый или черный цвет окраски высокой насыщенности. Никакой постимплантационной термической обработки при этом не потребовалось.

Микроскопическое изучение облученных кристаллов с применением методик петрографического анализа в поляризованном свете, в иммерсионных жидкостях и с использованием специализированного геммологического инструментария позволило констатировать равномерное распределение наведенной окраски по всему объему ограненных камней. В первом случае фантазийная ярко-желтая окраска высокой насыщенности и чистоты является идентичной природному аналогу «Fancy Light Yellow». Экспериментальное изучение имплантационно обработанных алмазов с привлечением методики адсорбционной оптической спектроскопии, позволило выявить в оптических спектрах облученных образцов ряд характеристичных полос поглощения, связанных с радиационным повреждением и формированием в структуре алмаза комбинаций различных электронно-дырочных центров, аналогичных тем, которые наблюдаются у природных алмазов фантазийной окраски.

Проделанная работа показала, что методика высокодозной ионной имплантации является эффективным способом изменения колориметрических и квантово-оптических свойств (окраски) минералов, и представляет собой экспрессный способ облагораживания, т.е. модификации камнесамоцветного минерального сырья. Углубление методов ионной имплантации до уровня промышленных технологий позволит в перспективе создать новый класс драгоценных камней – имплантантов.

*Работа проведена при финансовой поддержке ФЦП «Научные и научно-педагогические кадры инновационной России».*