

УДК 550.42:546.27

МИНЕРАЛОГИЯ

И. Б. БЕРМАН, К. Д. ДЕМАКОВ, А. Н. СТОЛЯРОВА

**К ВОПРОСУ О ПРИМЕНЕНИИ (n, α) -РАДИОГРАФИИ
ДЛЯ КОЛИЧЕСТВЕННОГО ОПРЕДЕЛЕНИЯ БОРА
В МИНЕРАЛАХ И ПОРОДАХ**

(Представлено академиком Н. В. Беловым 11 III 1976)

Изучение распределения и содержания бора в породообразующих минералах и выявление минералов-концентраторов этого элемента представляет не только теоретический, но и определенный практический интерес, поскольку подобные исследования могут оказаться ценными при установлении поисковых критериев и при оценке новых боропроявлений.

В настоящее время единственный метод, позволяющий одновременно с выявлением пространственного распределения бора определять с высокой чувствительностью его концентрацию — это метод (n, α) -радиографии. Он основан на регистрации твердотельным детектором α -частиц, образующихся при взаимодействии нейтронов с ядрами ^{10}B .

Методические особенности (n, α) -радиографии описаны (см., например, ^(1, 2)). Имеющиеся в литературе сведения о применении этого метода относятся главным образом к выявлению пространственного распределения бора в минералах и породах ^(3, 4). Данные о его применении для количественных подсчетов весьма малочисленны.

Так как при анализе пространственного распределения бора проводят относительное сопоставление треков, образующихся от отдельных частей минерала или породы, то при этом не требуется точного знания нейтронного потока, вызывающего (n, α) -реакцию в исследуемом объекте. Напротив, количественное определение бора базируется на точном подсчете числа α -треков в интересующей точке объекта и точном определении величины интегрального потока нейтронов.

Сечение взаимодействия нейтронов с ядрами ^{10}B имеет сложный характер, а энергетический спектр нейтронов, которым облучается исследуемый образец, как правило, заранее неизвестен. В связи с этим при (n, α) -радиографическом определении бора (аналогично тому, как это делается, например, при f-радиографическом определении урана ⁽⁵⁾), целесообразно облучать исследуемые образцы одновременно с борными мишенями-мониторами.

В литературе нет конкретных сведений о дозиметрии нейтронных потоков при определении бора в породах и минералах методом (n, α) -радиографии. Ниже рассматриваются вопросы изготовления борных мишеней для измерения нейтронных потоков и для определения содержания бора в исследуемых пробах с применением этих мишеней.

Изготовление мишеней-мониторов нейтронных потоков для радиографического анализа элементов можно проводить различными способами. Так, при f-радиографическом определении урана может применяться способ, в котором мишени готовятся нанесением на подложку капли урансодержавшего раствора и последующим выпариванием растворителя ⁽⁶⁾. Однако такой способ непригоден для изготовления борных мишеней из-за невозможного изменения концентрации борсодержащих растворов за счет

сорбции или десорбции бора стеклом^(7, 8), из которого изготовлена лабораторная химическая посуда для приготовления и хранения растворов, а также для нанесения капель раствора на подложку.

Непригодным оказался также способ приготовления мониторов путем смешивания определенного количества бора с «безборной» породой или химическим соединением из-за того, что даже при самом тщательном перемешивании компонентов бор неоднородно распределяется в мишени.

Кроме того, приготовленные этими способами мишени недолговечны. Они пригодны, как правило, только для одно-двухразового использования.

Для мониторингирования нейтронных потоков при (n, α)-радиографическом определении бора нами принят способ изготовления мишеней, который, по нашему мнению, свободен от отмеченных недостатков.

С этой целью выбрана следующая методика приготовления мишеней. Пластины высокочистого кремния n -типа с удельным сопротивлением 1000 ом/см вырезались параллельно плоскости (111) и для получения ровной поверхности механически шлифовались и подвергались травлению при комнатной температуре в травителе СР-4 в течение 5 мин. Обработанные таким образом пластины кремния помещались в приемник ионно-лучевой установки ИЛУ-3 и облучались ионами ^{10}B с энергией ~ 40 кэВ перпендикулярно их поверхности.

Таким способом были изготовлены мишени с содержанием ^{10}B от $1,2 \cdot 10^{12}$ до $1,2 \cdot 10^{16}$ ат/см². Количество бора контролировалось непосредственно при изготовлении мишеней по плотности тока и времени облучения ионами и проверялось на готовых мишенях по измерению слоевого сопротивления кремния, легированного бором. Точность определения содержания бора на мишенях составляла 5–10%.

Вплотную к мишеням прикреплялся детектор из нитрата целлюлозы, и они облучались нейтронами в ядерном реакторе. При этом для повышения точности мониторингирования нейтронных потоков одновременно облучалось несколько мишеней. Кроме того, для контроля низких нейтронных потоков одновременно с мишенями облучались специально изготовленные борсодержащие стекла с известным содержанием бора по данным их химического анализа.

После облучения детекторы отделялись от мишеней и подвергались травлению в 20% NaOH при 40°С в течение 20 мин. Затем на их поверхности подсчитывалось число α -треков.

Результаты измерения плотности треков в различных участках мишени показали, что бор на них нанесен достаточно равномерно. Это позволяет относительно быстро и просто подсчитать число треков, которое обеспечивает статистическую погрешность не более $\pm 3\%$.

Для определения вклада от (n, α)-реакций на ядрах бора в кремниевой подложке и ядрах элементов, входящих в состав нитрата целлюлозы, в каждом случае проводился подсчет «фоновой» плотности треков, которая вычиталась из суммарной.

Результаты подсчета числа треков в зависимости от содержания бора на мишенях, выполненные при потоках нейтронов от 10^9 до 10^{13} н/см², представлены на рис. 1. Прямолинейный характер зависимости и отсутствие разрывов прямой свидетельствуют о том, что изготовленные мишени

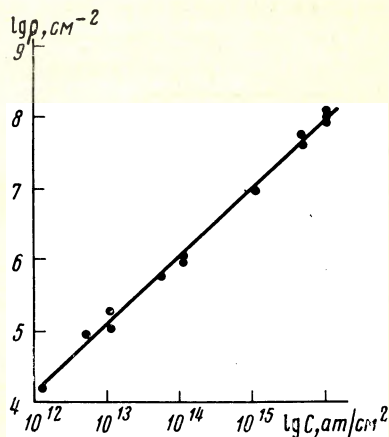


Рис. 1. Зависимость плотности треков (p) от количества ^{10}B (C) на мишени

пригодны для использования при определении нейтронных потоков в широком интервале значений ⁽⁶⁾.

Сравнение результатов определения нейтронных потоков по борным мишеням и борсодержащим стеклам показало, что расхождение в этих величинах не превышает 5—7%. Применение нескольких (4—5) мишеней, набор достаточной статистики и применение метода наименьших квадратов для обработки результатов измерений позволяют определять нейтронные потоки с точностью не хуже $\pm 8-10\%$.

Так как относительное выгорание мишеней не превышает 10^{-6} , то при отсутствии значительных механических повреждений мишени можно применять многократно.

Таким образом, предлагаемые мишени пригодны для мониторингирования нейтронных потоков от 10^9 до 10^{13} н/см². Это, в свою очередь, позволяет применять (n, α)-радиографический метод определения содержания бора в минералах и породах от десятков до $10^{-4}\%$.

Всесоюзный научно-исследовательский
институт ядерной геофизики и геохимии
Москва

Поступило
10 II 1976

ЛИТЕРАТУРА

- ¹ И. Г. Берзина, В. Я. Киевский, Ядерная геофизика, Тр. ВНИИЯГГ, в. 9, 153, «Недра», 1971. ² И. Г. Берзина, С. В. Малинко, ДАН, т. 189, № 4, 849 (1969).
³ И. Г. Берзина, И. Б. Берман и др., Изв. АН СССР, сер. геол., № 8, 75 (1974).
⁴ M. Seitz, S. Hart, Earth and Planet. Sci. Letters, v. 21, № 1, 97 (1973). ⁵ И. Г. Берзина, И. Б. Берман и др., Атомная энергия, т. 23, в. 6, 520 (1967). ⁶ М. Ю. Гурвич, Недеструктивные активационные методы анализа некоторых видов минерального сырья и применяемая аппаратура, ОНТИ ВНИИЯГГ, М., 1972, стр. 114. ⁷ Н. В. Белов, Очерки по структурной минералогии, Минералогич. сб., № 8, 13, Изд. Львовск. ун-та, 1954. ⁸ И. М. Коренман, Аналитическая химия малых концентраций, М., «Химия», 1967.