

РАЗВИТИЕ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ РАЗРЯДОВ В ВОДНЫХ МИНЕРАЛЬНЫХ СУСПЕНЗИЯХ (ПИРИТ) ПРИ ВОЗДЕЙСТВИИ МОЩНЫХ ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫХ ИМПУЛЬСОВ

И.Ж. Бунин, М.В. Рязанцева, И.А. Хабарова

*Институт проблем комплексного освоения недр им. академика Н.В. Мельникова РАН,
Крюковский туп. 4, Москва 111020, Россия, bunin_i@mail.ru, xabosi@mail.ru*

В докладе рассмотрена модель развития электрических разрядов между частицами полупроводниковых рудных минералов (например, пирита FeS_2) под действием мощных (высоковольтных) наносекундных электромагнитных импульсов в жидкой (водной) среде. Показана возможность электрических пробоев водных промежутков между частицами, вероятность которых и выделяющаяся в разрядных каналах энергия существенно зависят от проводимости сульфида. В случае сухого порошкообразного образца разряды в промежутках между частицами являются электрическими разрядами в воздухе при атмосферном давлении; малая начальная плотность среды определяет сравнительно небольшое давление на фронте расширяющегося разрядного канала. Для получения разрядов в слоях воды необходимы большие напряжения на разрядных промежутках. Наличие водной среды приводит к большему энерговыделению в промежутках между частицами, что является следствием высокой диэлектрической проницаемости воды и, как следствие, большему давлению в канале разряда. Действие ударной волны от расширяющегося канала разряда является дополнительным разрушающим фактором (электрогидравлический удар), способствующим увеличению трещинообразования вокруг канала пробоя. Для повышения эффективности обработки водной минеральной суспензии с целью дезинтеграции минеральных комплексов, раскрытия сростков минералов и структурно-химического модифицирования поверхности сульфидов необходимо подбирать электрофизические параметры высоковольтных импульсов. Для дезинтеграции минеральных частиц с высокой проводимостью следует использовать более короткие импульсы с большей амплитудой напряжения и более коротким передним фронтом, в то время как для частиц с низкой проводимостью требуются импульсы с большей длительностью.

Ключевые слова: электрические разряды в водной среде; полупроводниковые минералы; проводимость.

DEVELOPMENT OF ELECTRIC DISCHARGES IN WATER MINERAL SUSPENSIONS (PYRITE) UNDER THE INFLUENCE OF HIGH-POWER ELECTROMAGNETIC PULSES

Igor Zh. Bunin, Maria V. Ryazantseva, Irina A. Khabarova

*Melnikov's Institute of Comprehensive Exploitation of Mineral Resources
of the Russian Academy of Science, 4 Kryukovsky Tupik, 111020 Moscow, Russia,
bunin_i@mail.ru, xabosi@mail.ru*

In this report, we considered a model for developing electric discharges between sulfide minerals (for example, pyrite FeS_2) particles under high-power (high-voltage) nanosecond electromagnetic pulses in a liquid (water) medium. A possibility of electrical breakdowns of liquid gaps between particles under nanosecond pulses is shown. The probability and the energy released in discharge channels depend strongly on the sulfide conductivity. In a dry mineral powder, discharges in gaps between particles are of air type (nanosecond electrical discharges in atmospheric air); the low initial density of the medium ensures a relatively low pressure at the front of the expanding discharge channel. The large voltages on discharge gaps are necessary to obtain discharges in water layers. The presence of a water leads to a higher energy release in the gaps between particles, which is caused by high water permittivity, and, correspondingly, to a higher pressure in the discharge channel. The shock wave from the expanding discharge channel is an additional destructive factor (electrohydraulic shock), which facilitates crack formation around the breakdown channel. The parameters of high-voltage pulses should be chosen such as to provide effective fracture (maximum disintegration or effective surface modification) of submillimeter particles of semiconducting minerals in water. To disintegrate particles with high conductivity, one has to use shorter pulses with a larger voltage amplitude and shorter leading edge, while low-conductivity particles require longer pulses.

Keywords: nanosecond electrical discharges in water; semiconductor ore minerals; conductivity.

Введение

В процессах обогащения минерального сырья для преодоления физической упорности руд и повышения контрастности технологических свойств целевых минералов начали активно использовать немеханические энергетические способы разрушения и, в особенности, воздействия в импульсном режиме (импульсная энергетика большой мощности [1] и электроразрядные (разрядно-импульсные) технологии [2-5]), обеспечивающие дезинтеграцию минерального сырья по межфазовым границам за счет образования микротрещин и каналов пробоя [4, 5]. Следует отметить, что в подавляющем большинстве случаев обогащение руд осуществляется в жидкой (водной) среде (например, тонкое дробление и измельчение, флотация, мокрое гравитационное обогащение и другие операции). Процесс развития импульсно-периодических электрических разрядов в жидкости и механизм импульсного пробоя воды с микрочастицами (минеральные суспензии, пульпы) для практического применения изучены недостаточно подробно.

Цель данной работы — изучение процесса развития электрических разрядов между частицами полупроводниковых рудных минералов при воздействии мощных (высоковольтных) электромагнитных импульсов (МЭМИ [4, 6]) наносекундной длительности в жидкой (водной) среде.

Материалы и методы исследования

Рассмотрен случай, когда частицы природного пирита *n*-типа размером ~100 мкм расположены между двумя плоскими электродами генератора импульсов; ширина межэлектродного зазора 5 мм. Промежутки (зазоры) между минеральными частицами — типа острие-плоскость; размер частиц и высота неровностей (выступов, острий) на поверхности частиц задавались с некоторым разбросом. Для всех частиц радиусы неровностей поверхности и каналов пробоя задавались равными 1 мкм. Амплитуда им-

пульсов высокого напряжения $U_A=50$ кВ, длительность импульсов $\tau_{\text{imp}}=40$ нс. Пирит (FeS_2 , полупроводниковый рудный минерал; дисульфид железа: 46.6% Fe; 53.4% S); твердость по шкале Мооса 6-6.5; плотность 4.9-5.2 г/см³; теплопроводность ~48 Вт/(м·К) при $T=300$ К; температура плавления 1177-1188 °С; нерастворим в воде. Удельное сопротивление природного пирита *n*-типа 10^{-4} - 10^{-1} Ом·м, коэффициент ТЭДС от +230 до +300 мкВ/°С; концентрация носителей *n* и *p*-типа 10^{14} - 10^{19} см⁻³; подвижность электронов в пирите 10-50 см²/В·с; ширина запрещенной зоны ~1 eV.

Результаты и их обсуждение

Основное различие механизмов межчастичных разрядов в воде и в воздушных промежутках заключается в том, что подвижность и время жизни электронов в жидкости сравнительно малы. Во-первых, частота упругих столкновений электрона на порядки величины выше, чем в газе нормальной плотности. Во-вторых, большую роль играют неупругие столкновения: электрон быстро сольватируется или прилипает к молекулам воды или водным кластерам. Подвижность таких комплексов значительно ниже подвижности электронов и ниже подвижности таких ионов, как ионы гидроксидов и водорода. Основными подходами к описанию электрического разряда в жидкости являются тепловой (пузырьково-стримерный) и электронный механизмы [7]. Наиболее изучены разряды в водной среде для относительно больших разрядных промежутков (от ~1 мм до нескольких сантиметров) в условиях постоянного приложенного напряжения или импульсов напряжения с фронтами нарастания ~1 мкс и более [7].

В минеральной суспензии соседние частицы могут соприкасаться или находятся в неплотном контакте друг с другом (расстояние между ними от ~10 нм до ~1 мкм), и поэтому разница в скорости распространения катодного и анодного стримеров не играет решающей роли в иницировании разряда. При инициро-

вании разряда автоэмиссионным током как с положительного, так и с отрицательного острия (неровности поверхности частицы), этот ток перекрывает разрядный промежуток, и разряд переходит в искровой практически без задержки на стадию роста стримера. Предположим, что возможно как анодное, так и катодное инициирование разряда, а механизм анодного инициирования является автоэмиссионным (полевым). Электрическое поле, усиленное вблизи положительного контакта, приводит к автоэмиссии электрона в жидкости у поверхности электрода. В рамках зонной модели [7] эмиссия электронов рассматривается как туннельный переход из валентной зоны жидкости в зону проводимости полупроводникового минерала. При катодном инициировании источником начального тока разряда может быть эмиссионный ток из полупроводника в жидкость. В докладе на основе анализа баланса заряда ($Q(t)$) на поверхности отдельной частицы пирита рассмотрен процесс развития разрядов в промежутках между минеральными частицами, расположенными в линейной цепочке между внешними электродами.

При $\sigma \sim 0.1$ (Ом·м) $^{-1}$ к концу действия импульса напряжения пробой происходят почти во всех промежутках. Плотность тока в каналах пробоя порядка $2 \cdot 10^{12}$ А/м 2 . С повышением напряжения в импульсе время, за которое пробиваются промежутки между частицами, уменьшается. При $\sigma \sim 0.01$ (Ом·м) $^{-1}$ промежутки между частицами начинают пробиваться по истечению 25 нс, и за время импульса пробивается меньше половины промежутков. Плотность тока в канале пробоя при этом уменьшается более чем на порядок величины. Значения давления в ударной волне, распространяющейся от канала пробоя, на расстоянии ~ 5 мкм от оси канала составляют 5.0, 0.6 и 0.08 МПа для частиц с проводимостью 1.0, 0.1 и 0.01 (Ом м) $^{-1}$ соответственно. Таким образом, для получения разрядов в водных промежутках требуются большие напряжения на разряд-

ных промежутках, чем в воздушных разрядных промежутках.

Заключение

Для повышения эффективности электроимпульсного воздействия на субмиллиметровые частицы полупроводниковых рудных минералов в водной среде с целью дезинтеграции минеральных комплексов (раскрытия сростков минералов) и структурно-химического модифицирования поверхности сульфидов необходимо подбирать электрофизические параметры высоковольтных импульсов. В случае обработки минеральных частиц с высокой проводимостью необходимы более короткие импульсы с большей амплитудой напряжения и более коротким фронтом; для частиц с малой проводимостью эффективнее применение импульсов с большей длительностью.

Библиографические ссылки

1. Месяц Г.А. Импульсная энергетика и электроника. Москва: Наука; 2004. 704 с.
2. Курец В.И., Соловьев М.А., Жучков А.И., Барская А.В. Электроразрядные технологии обработки и разрушения материалов. Томск: Изд-во ТПУ; 2012. 272 с.
3. Huang W., Chen Y. The application of high voltage pulses in the mineral processing industry – A review. *Powder Technology* 2021; 393(11): 116-130.
4. Chanturiya V.A., Bunin I.Zh., Lunin V.D., Gulyaev Yu.V., Bunina N.S., Vdovin V.A., Voronov P.S., Korzhenevskii A.V., Cherepenin V.A. Use of powerful electromagnetic pulses in processes of disintegration of gold-containing raw materials. *J. of Mining Science* 2001; 37(4): 427-437.
5. Чантурия В.А., Бунин И.Ж. Нетрадиционные высокоэнергетические методы дезинтеграции и вскрытия тонкодисперсных минеральных комплексов. *Физико-технические проблемы разработки полезных ископаемых* 2007; (3): 107-128.
6. Вдовин В.А., Денисов Р.А., Сапешкий С.А., Черепенин В. А. Технология экспериментов нетеплового воздействия мощных электромагнитных импульсов на естественные и искусственные среды. *Радиотехника и электроника* 2023; 68(9): 910-916.
7. Ушаков В.Я., Климкин В.Ф., Коробейников С.М., Лопатин В.В. Пробой жидкостей при импульсном напряжении. Томск: Изд-во НТЛ; 2005. 488 с.