

ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ
БЮДЖЕТНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ НАУКИ

Физический
ИНСТИТУТ



имени
П.Н. Лебедева

Российской академии наук

Ф И А Н

ПРЕПРИНТ

6

С.Д. ЗОТОВ, Е.М. КУДРЯВЦЕВ, Э.Н. ЛОТКОВА,
М.М. ЛЯХОВИЦКИЙ, А.А. ЛЕБЕДЕВ

**РЕГИСТРАЦИЯ АКУСТИЧЕСКИХ СИГНАЛОВ
ОТ МЕТАЛЛИЧЕСКИХ СТЕРЖНЕЙ
(АЛЮМИНИЙ И МЕДЬ) В РЕЗУЛЬТАТЕ
ВОЗДЕЙСТВИЯ ИНФРАКРАСНОГО
ЛАЗЕРНОГО ИМПУЛЬСА**

Москва 2013

Регистрация акустических сигналов от металлических стержней (алюминий и медь) в результате воздействия инфракрасного лазерного импульса

С.Д. Зотов, Е.М. Кудрявцев, Э.Н. Лоткова, М.М. Ляховицкий*, А.А. Лебедев

* Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт металлургии и материаловедения им. А.А. Байкова Российской академии наук

Аннотация

Зарегистрированы акустические сигналы, акустическая эмиссия (АЭ), на частоте 30-600кГц, от торцов стержней алюминия (размером 111,7х2х3 мм) и меди (190х5х5 мм) в результате воздействия на противоположные торцы импульсом сфокусированного инфракрасного излучения газоразрядного CO₂ лазера (мощность излучения ~5 Вт, длина волны 10 мкм). Для регистрации и измерения параметров АЭ применялась универсальная диагностическая система СДС 1008. С каждым образцом было произведено несколько опытов.

В случае алюминия помимо акустических шумов наблюдались акустические сигналы, которые можно объяснить непосредственным локальным воздействием ИК импульса, в результате чего возникают волны напряжения. В случае меди наблюдались лишь акустические сигналы, обусловленные акустическими шумами (возможным образованием и перемещением дислокаций в металле, микротрещин и т.п.). Акустические события, связанные с непосредственным воздействием ИК импульса, в медном стержне не наблюдались. Вероятнее всего, это объясняется большим, по сравнению с алюминием, коэффициентом затухания акустических волн.

Подтвержден принцип Кайзера – “невоспроизводимость АЭ при повторном ее возбуждении в опытах через малые промежутки времени”.

Введение

Ранее при облучении ряда твердых образцов импульсом сфокусированного инфракрасного лазерного излучения наблюдалось изменение их оптических свойств, таких, как отражение видимого света – возникновение волны изменения интенсивности отраженного видимого света типа уединенной волны [1,2,3], а также, в некоторых случаях, волны проводимости [4]. Природа этого явления, первоначально названного «волна изменения отражения и проводимости» (ВИОП), в последнее время называемое «медленные уединенные упругие волны» - МУУВ. до сих пор не определена. Если воздействие ИК импульса на твердое тело связано с изменением его упругих свойств и носит локальный характер, то можно предположить, что оно может вызывать волны напряжения [5], т.е. *локальные механические волны*, а, следовательно, при этом должны наблюдаться акустические сигналы, т.е. происходить и акустическая эмиссия (АЭ), *ибо, как известно, условием возникновения АЭ является локальность воздействия источника* [6,7]. В работе [6, стр.15] дается следующее определение: «акустической эмиссией обозначают процесс излучения волн напряжения, вызванных внутренними источниками, расположенными в толще исследуемого материала».

В представленной работе исследовалась АЭ стержней из алюминия и меди при облучении их торца импульсом инфракрасного лазерного излучения.

Методика эксперимента

Образцы были в виде стержней с прямоугольным сечением - алюминиевый, размером 111,7x2,4x3 мм, и медный, размером 190x5x5 мм. Один из торцов стержня облучался импульсом инфракрасного (ИК) излучения непрерывного газоразрядного CO₂ лазера с длиной волны 10 мкм. На противоположный торец крепился приемник АЭ. Диаметр «фокального» пятна ИК излучения на поверхности облучаемого торца составлял <0,5 мм. Для получения импульса излучения применялся механический прерыватель. Мощность излучения лазера составляла ~ 5 Вт, Длительность импульса – 0,3 сек.

Для регистрации АЭ применялся акустический дифференциальный датчик, сигнал от которого через дифференциальный широкополосный

усилитель подавался на анализатор импульсов акустической эмиссии СДС 1008, затем выводился для регистрации на персональный компьютер, оснащенный специальной программой.

Общая схема экспериментальной установки и связь акустического датчика с компьютером приведены на рис.1 .

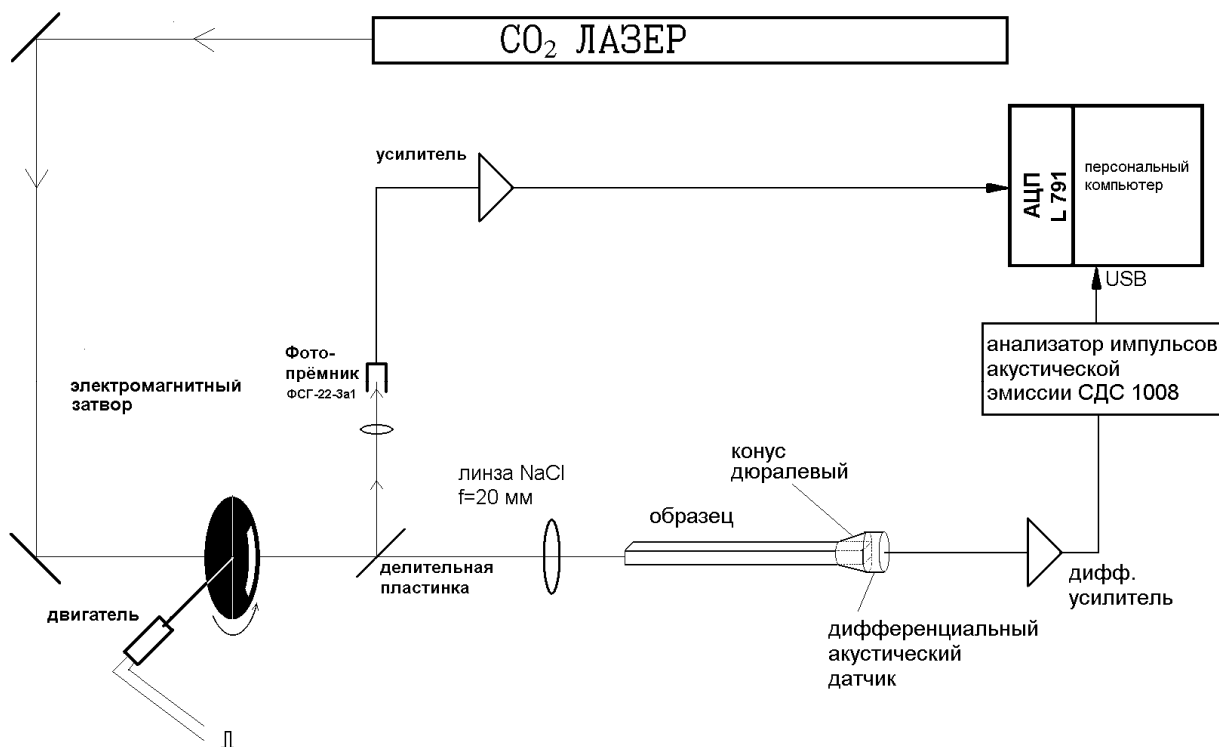


Рис.1. Схема экспериментальной установки.

С помощью специальной программы на компьютере воспроизводились время наступления акустического события, форма и максимум амплитуды сигнала АЭ (в дБ и мВ) во временной шкале, частотный спектр (в кГц) и энергия (в дБ и мВ²с). Минимальная амплитуда регистрируемого сигнала составляла 26,82 дБ (т.е. 0,02192 мВ). Событием АЭ, обусловленным непосредственным действием ИК импульса, с учетом акустических шумов и электрических наводок, является сигнал с максимумом амплитуды >0,30 мВ (т.е.>49 дВ). Регистрировалось возникновение акустических событий в интервале частот 30-5000 кГц, одновременно шла регистрация накопления энергии сигнала.

Результаты эксперимента и их обсуждение

С каждым образцом было произведено несколько опытов - облучение ИК импульсом с исследованием акустической эмиссии (АЭ). Опыты с каждым образцом производились несколько раз, в один день. Каждый раз после начала ИК импульса запись сигнала АЭ продолжалась минимум в течение получаса.

В наших экспериментах после включения ИК импульса наблюдались акустические события на протяжении первых десяти микросекунд одинакового во всех опытах вида, что можно связать с электрическими наводками в момент включения и выключения ИК импульса. ИК импульс подавался после начала сбора данных с задержкой 10,5 сек в случае с алюминием и 17,45 сек в случае с медью.

Так как действующий на образец ИК импульс имеет форму, близкую к прямоугольной (см. рис. 2), при интерпретации наблюдаемого акустического события, представляющего собой картину убывающих равномерно сигналов, мы, частично, пользовались теоретическим анализом [5,6] случая, когда возбуждающий акустическую эмиссию сигнал имеет прямоугольную форму.

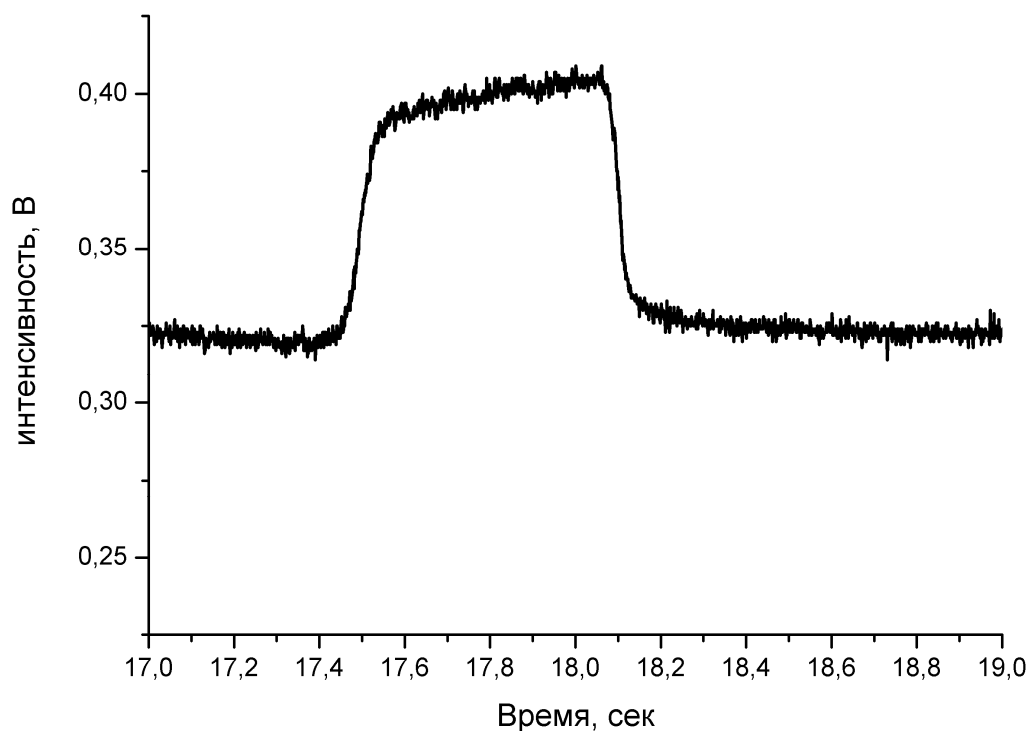


Рис. 2 Форма возбуждающего ИК импульса

В этих работах, представляя действия сигнала от источника акустической эмиссии, характеризующегося прямоугольной формой, в компонентах Фурье бесконечным набором синусоидальных волн с разными фазовыми и групповыми скоростями, показано, что форма сигнала АЭ будет искажена – основной импульс сопровождается «хвостом» колебаний высокой частоты, прямоугольная часть импульса превращается в колебательную кривую.

В качестве иллюстрации на рис. 3 (из работы [5]) приведена экспериментально зарегистрированная форма сигнала АЭ в результате возбуждения металлического образца коротким (1 мкс) акустическим импульсом.

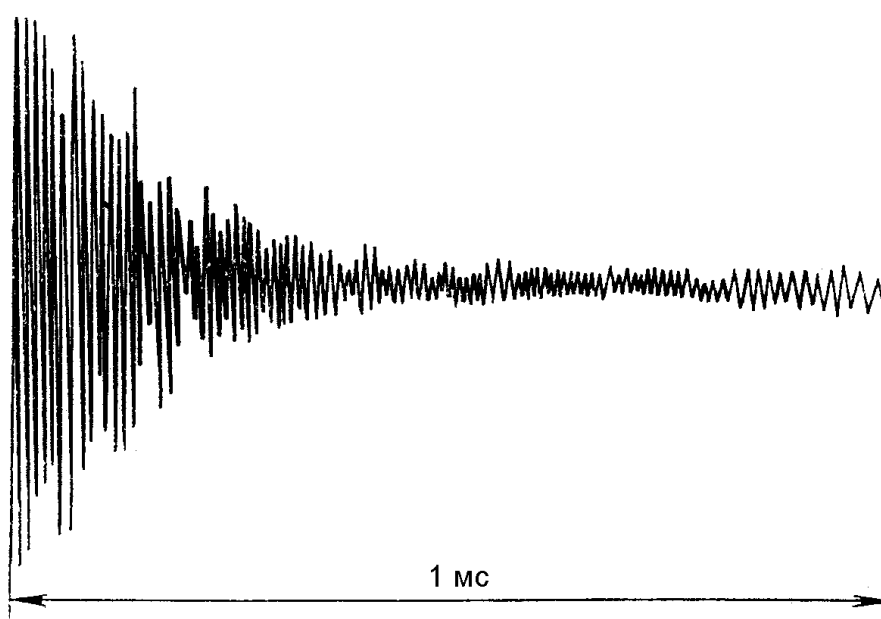


Рис. 3. Форма сигнала АЭ металлического образца из [5].

а) Результаты экспериментов с алюминием.

Было проведено 8 опытов.

Ниже, на рис.4 приводится общая картина событий во всех опытах с алюминиевым стержнем. Опыты обозначены (как в рабочем журнале) значком #.

Опыт #01- “нулевка” - запись показаний приемника АЭ без ИК импульса, сделанная при той же чувствительности аппаратуры, что и в последующих опытах. При этом никаких событий не обнаружено, поэтому соответствующая нулевая запись сигналов на рис.4 не приводится.

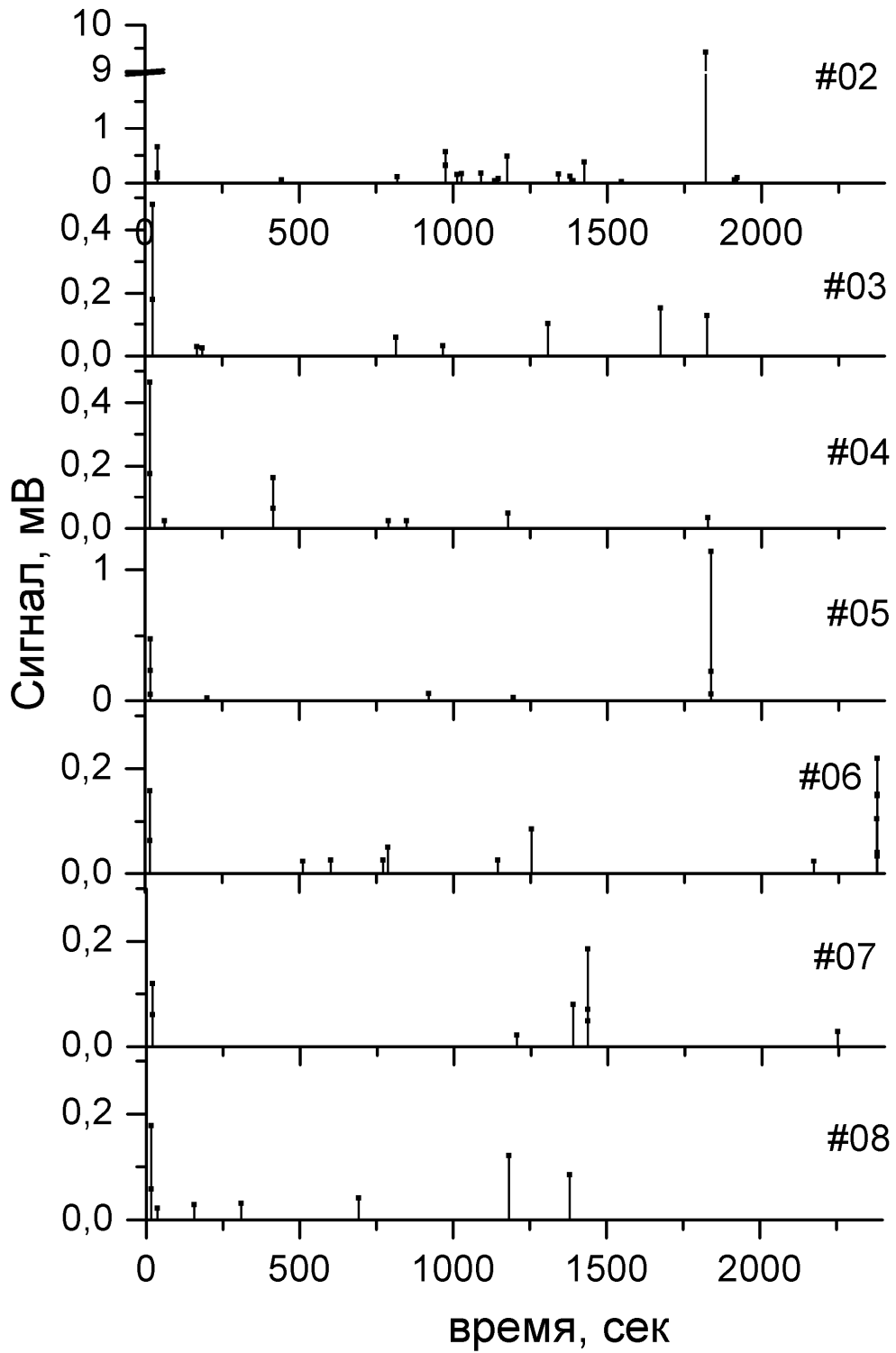


Рис.4. Общая картина событий во всех опытах с алюминиевым стержнем.

Поскольку каждый последующий опыт после первого опыта с возможными нарушениями состояния структуры в результате воздействия ИК импульса производился в тот же день, что и предыдущий, без отжига образца, целесообразно было подробный анализ наблюдаемых акустических событий (АС) проводить по данным, полученным в первом опыте с облучением образца, обозначенным в рабочем журнале как #02.

В опыте #02 наблюдалось 21 акустическое событие. Наблюдение велось в течение ~2000 секунд, до того момента, когда акустические сигналы не появлялись в течение 500 сек.

Как отмечалось выше, зарегистрированные акустические сигналы (АЭ) обусловлены действием ИК импульса, если величина их амплитуд больше 0,3 мВ. Исходя из этого, результаты в первом (т.е. #02) опыте можно интерпретировать следующим образом.

Из 21 наблюдаемых акустических событий только 3 соответствуют АЭ, обусловленной непосредственным воздействием ИК импульса.

Это события №№ 9, 18 и 20, т.е. соответственно,

на 1174 секунде (19 мин. 34 сек.),

на 1425 секунде (23 мин. 45 сек.)

и на 1818 секунде (30 мин. 18 сек.)

после момента начала облучения торца ИК импульсом.

На рисунках 5, 6 и 7 приведены форма сигналов (А) и их спектр (Б).

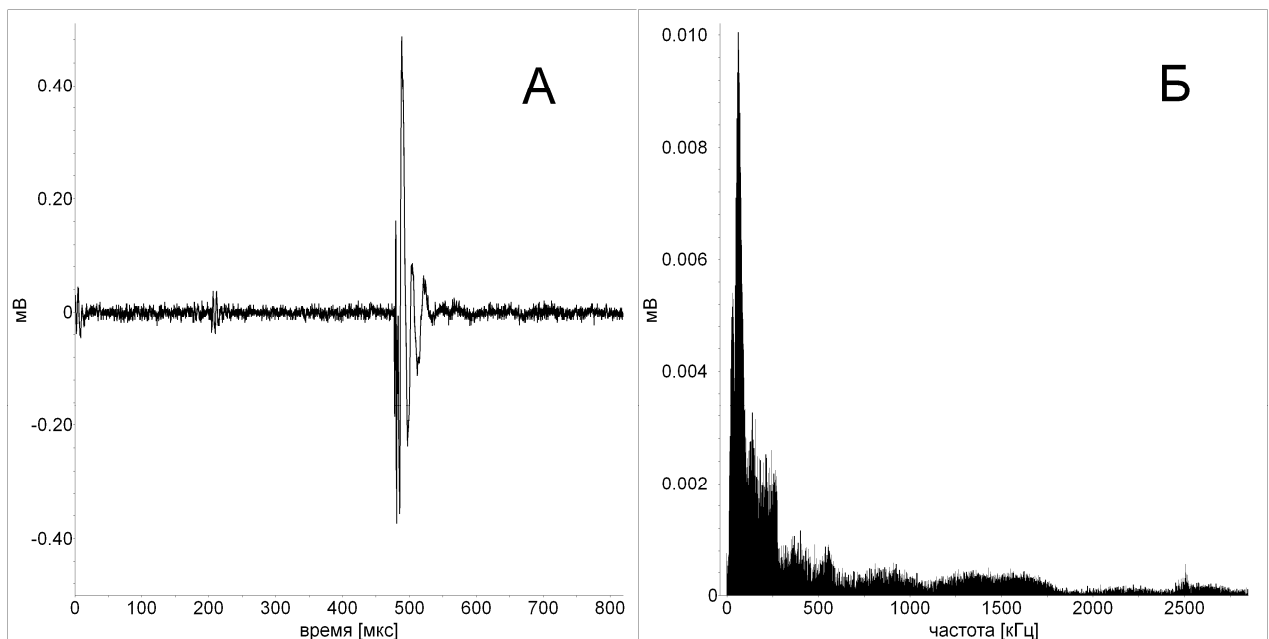


Рис. 5. Форма сигнала (А) и спектр (Б) события №9 на 1174 секунде после ИК импульса в опыте #02.

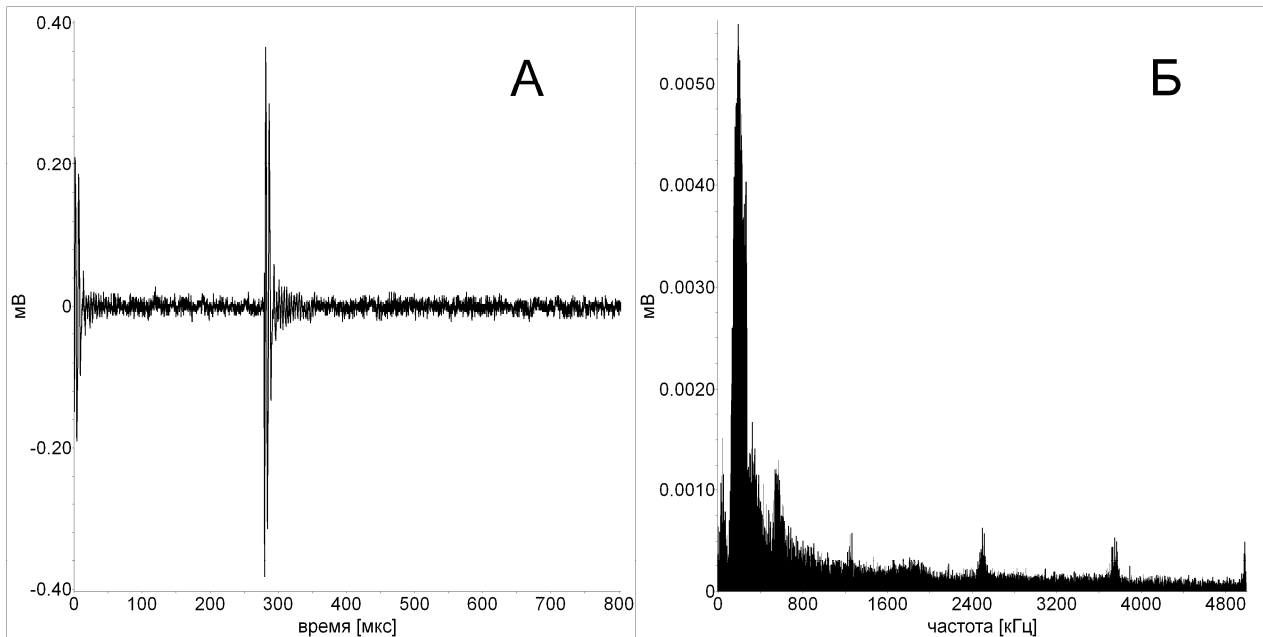


Рис.6. Данные события № 18 на 1425 секунде в опыте #02.

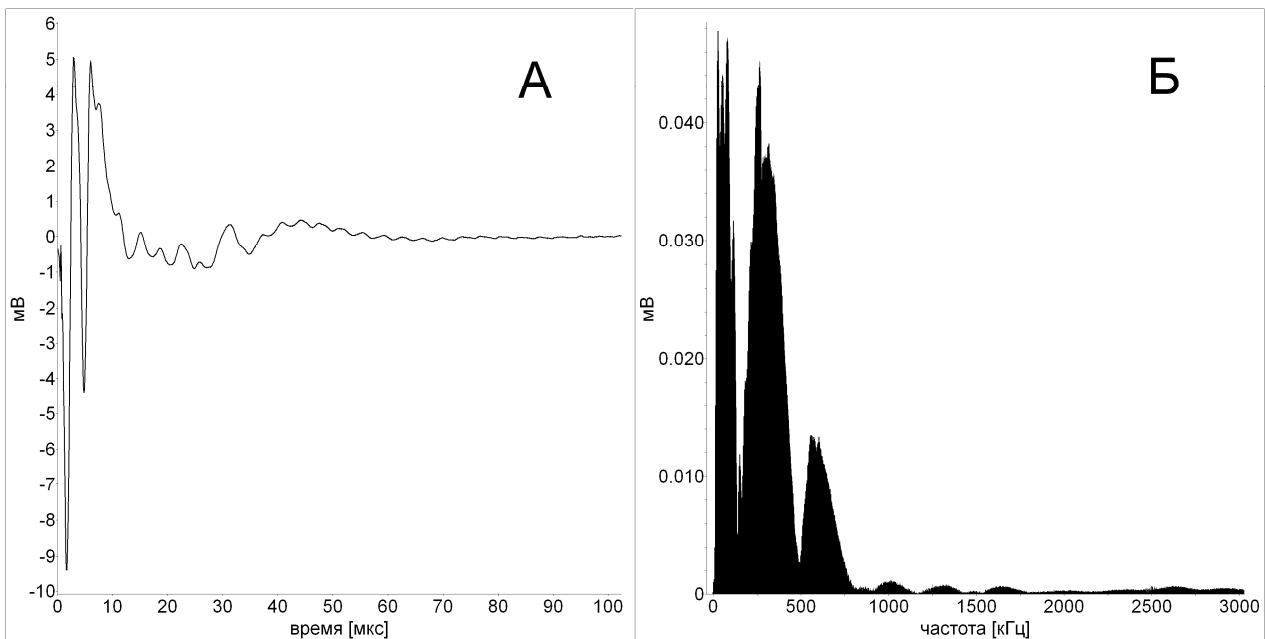


Рис 7. Данные события №20 на 1818 секунде в опыте #02.

Как видно, форма сигнала почти одинаковая – сигнал состоит из многих близлежащих компонент с постепенно убывающими амплитудами в интервале 30-40 мкс с «высокочастотным хвостом». Как было отмечено выше, такая форма соответствует возбуждающему импульсу прямоугольной формы, в нашем случае - возбуждающему ИК импульсу.

На приведенных рисунках 5(А), 6(А) и 7 (А) значения максимумов амплитуды сигнала превышают 0,3 мВ. – 0,47, 0,36 и 4,6 мВ, соответственно. Продолжительность сигналов около 50 мкс.

Частотный спектр – сложный - зарегистрированные акустические сигналы (события) имеют несколько максимумов на разных частотах, т.е. соответствующее событие состоит из нескольких механических волн с разными частотами. Как хорошо видно на рис.7 (Б), наблюдается несколько максимумов - на частотах ~50 – 80, 300, 400 и 550 – 600 кГц, с убывающей амплитудой, причем, наибольшая амплитуда сигнала, 5 мВ, - на частотах 30 – 200 кГц., самый мощный сигнал в спектре ~ 0,05 мВ на частоте ~100 кГц.

На приведенных рисунках в спектральных распределениях просматриваются также периодические максимумы (<0,0005 мВ) (особенно четко видны на рис.6Б) на частотах 1250, 2500, 3750 кГц и т.д. Их можно рассматривать как резонансные частоты акустического тракта. Такие сигналы наблюдаются во всех опытах.

В случае других зафиксированных событиях АЭ опыта #02, помимо событий №,№ 14,18 и 20, как уже отмечалось, наблюдаемые сигналы были очень малы или своеобразной формы. Для примера на рис.8 приводятся данные для события №8 на 975 секунде после ИК импульса. Как видно из этого рисунка (см. рис.8Б, на котором в спектре четко видно два максимум), а также и из рис.4, здесь происходит наложение двух событий, которые дают суммарную амплитуду >0,30 мВ

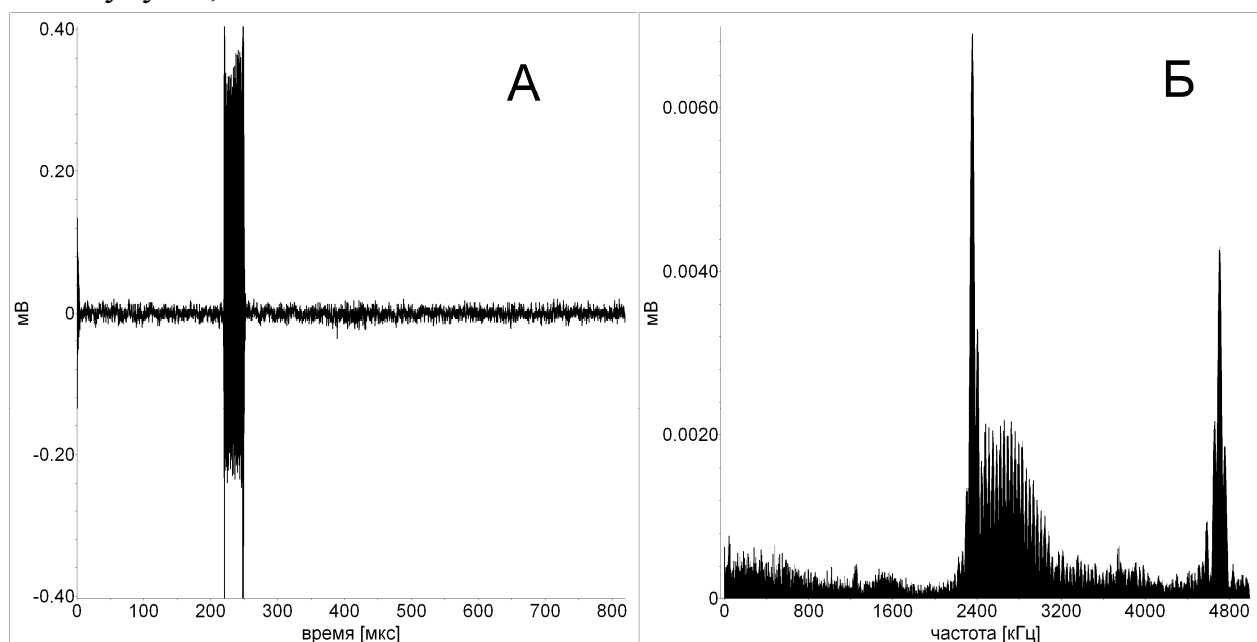


Рис.8 Форма и спектр события №8 на 975 секунде после ИК импульса в опыте #02.

В последующих опытах – #03-#08 -(проводимых, как уже отмечалось, в один и тот же день, друг за другом, с перерывом около 0,5 часа) событий происходило меньше (см. рис.4 со сводными данными всех наблюдавшихся событий во всех опытах с алюминием), с маленькими сигналами различной формы. Количество событий и времена их появления в каждом опыте, от опыта к опыту, в основном, не совпадают, за исключением события на 1818 секунде, которое с большой амплитудой и сложным спектром проявилось в первом, #02 опыте (см. рис.7), и в опыте #05.

Следует отметить, в опыте #05 после изменения места фокусировки ИК импульса был зафиксирован один мощный акустический сигнал величиною > 1 мВ на 1836 (30 мин. 36 сек.) секунде, см. рис.9, подобный сигналу, приведенному на рис.7 для опыта #02, т.е. явно связанный с эффектом ИК импульса. В последующих опытах после опыта #05 это событие не наблюдалось, как и после первого, #02, опыта - в опытах #03 и #04, в которых его также не было.

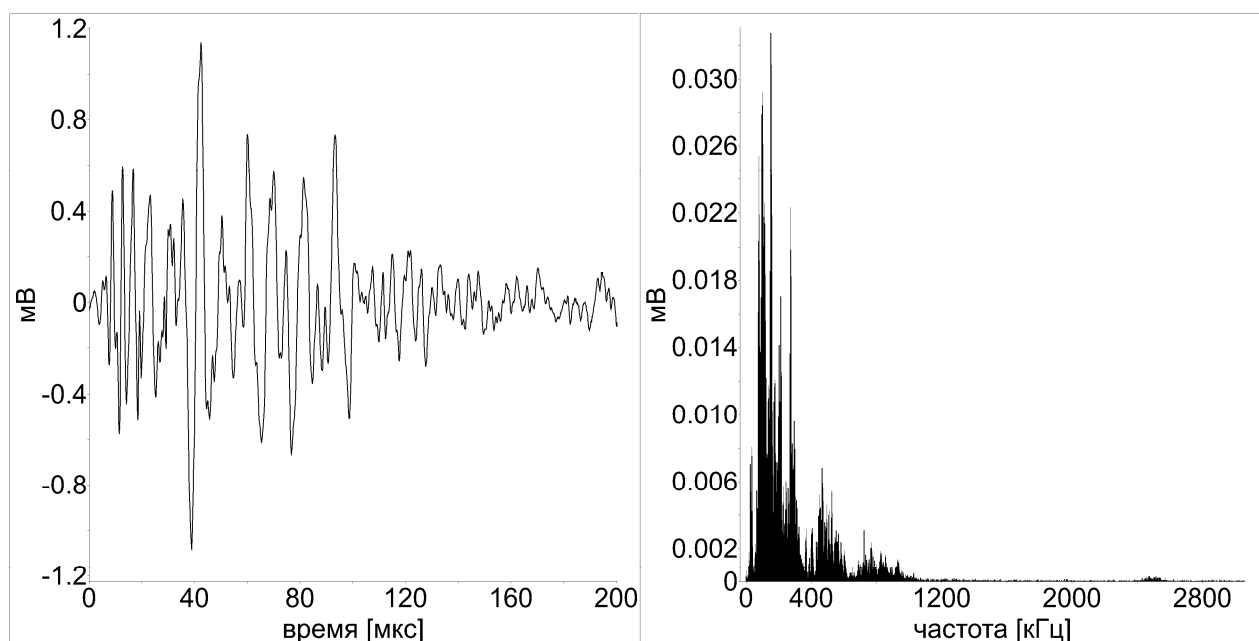


Рис. 9. Данные события №7 на 1836 секунде в опыте #05.

В опыте #03 для контроля работы всей приемной АЭ аппаратуры был проведен эксперимент с коротким ударом карандашом по алюминиевому стержню в месте, близком к торцу стержня, на который обычно подается ИК импульс. Соответствующие данные АС, форма сигнала и спектр, приведены на рис. 10 (событие №9) на 1824 секунде после ИК импульса.

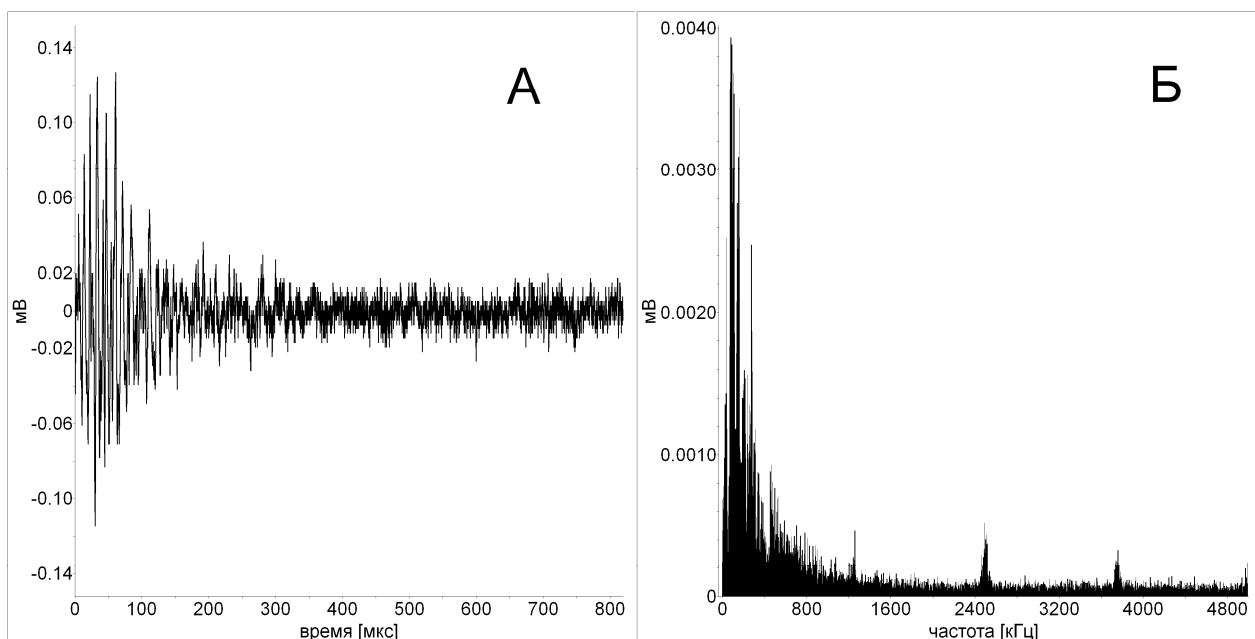


Рис.10 Форма сигнала и спектр акустической эмиссии при ударе по
алюминиевому стержню

Как видно, форма сигнала очень похожа на приведенную на рис. 3, и формы сигнала на рисунках 5, 6 и 7 событий, связываемых авторами с результатом непосредственного воздействия ИК импульса.

Интересно отметить, что картины на 16-ой секунде в опытах #04 и #05 очень похожие (см. Рис.11 и 12) - форма сигналов сложная, без «хвоста» с убывающими амплитудами, спектры имеют несколько резко выраженных максимумов, что говорит том, что в этих случаях проявляется несколько разных мелких событий с величиной суммарной амплитуды $\sim 0,4$ мВ.

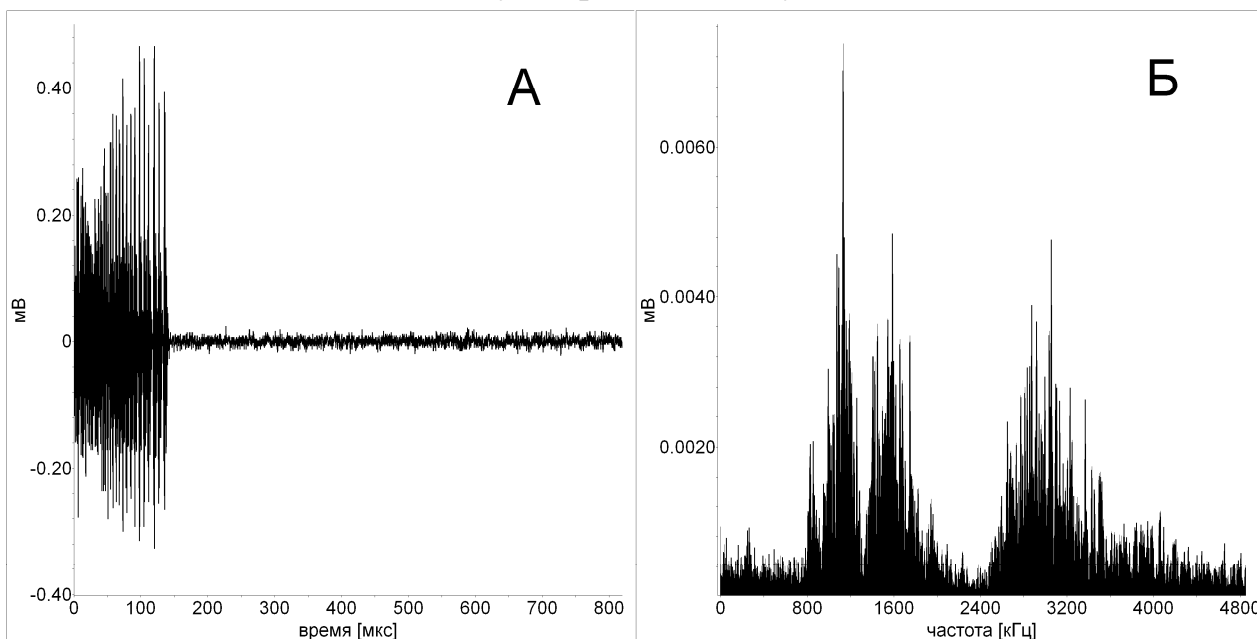


Рис.11. Форма и спектр события на 16 секунде в опыте #04.

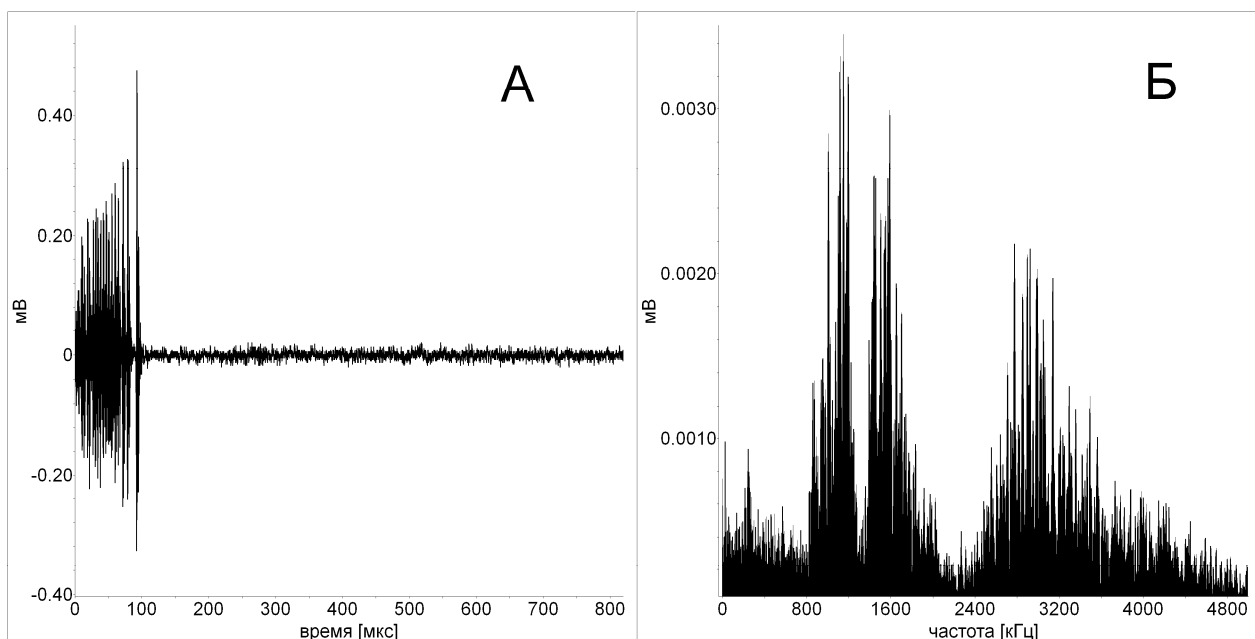


Рис.12. Данные события на 16 секунде в опыте #05.

Таким образом, проведенные эксперименты подтверждают локальность действия ИК импульса, в результате чего возникают акустические события с большой амплитудой, вызывающие некоторые изменения в облучаемом образце и порождающие более мелкие события, “акустические шумы”, в последующих, через небольшой период времени, опытах.

С целью проверки - не будут ли возникать события АЭ после почти часа, прошедшего с момента подачи ИК импульса, последний опыт-с алюминием (#08) продолжался около четырех часов. Как видно из рисунка 4, величина сигналов событий во всех случаях опыта #08 очень мала, величина максимальных амплитуд меньше 0,3 мВ. Вид картины в первые 15-40 секунд после ИК импульса в этом опыте аналогичен виду в предыдущих опытах (см. рисунки 11 и 12), для сравнения на рис. 13 приводятся данные для события №2 на 16-секунде после ИК импульса в этом опыте.

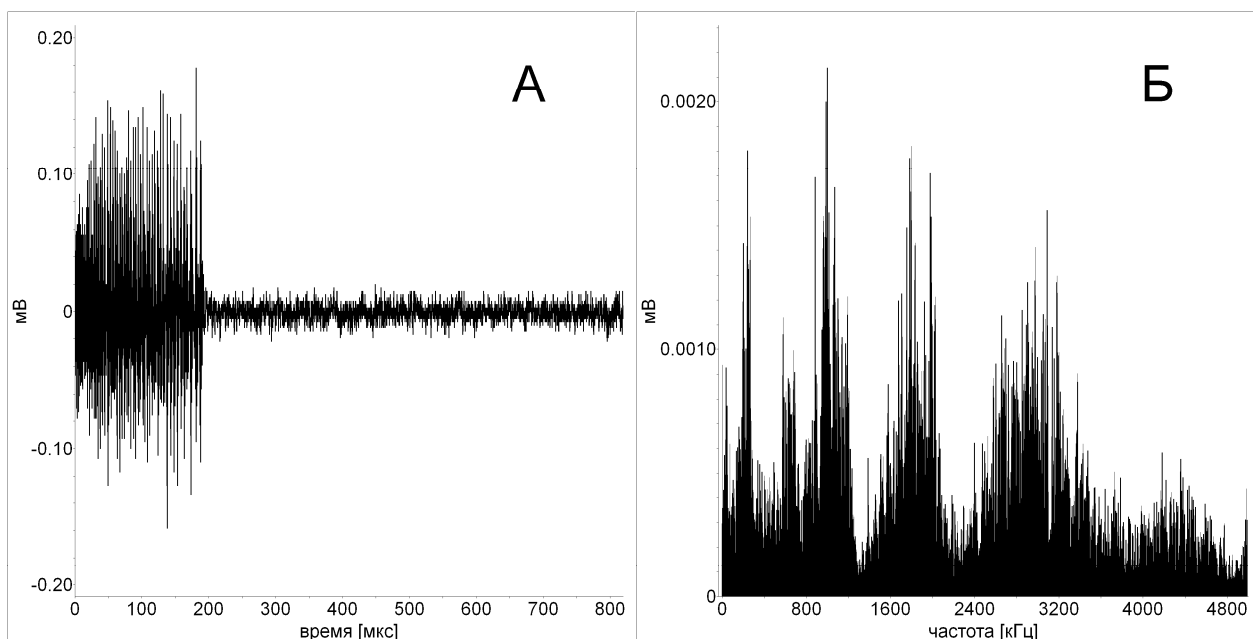


Рис. 13. Форма и спектр событий на 16 секунде в опыте #08.

Таким образом, можно считать, что в последнем опыте с алюминием, длившемся около 4-х часов, наблюдаемые акустические события также не обусловлены непосредственным действием ИК импульса.

Как видно из общей картины всех событий во всех проведенных опытах с алюминием (рис.4), картина возникновения акустических событий от опыта к опыту не повторяется, как уже отмечалось выше, т.е. наблюдается эффект Кайзера - «невоспроизводимость картины АЭ при повторном наблюдении через короткий промежуток времени». Следует отметить, что «неповторяемость» общей картины событий позволяет определить наличие посторонних механических шумов ([5], стр. 118).

Итак, из анализа данных всех проведенных экспериментов с алюминием можно считать, что результатом непосредственного воздействия ИК импульса, как отмечено выше, являются акустические события, возникшие через следующие промежутки времени после воздействия ИК импульса:

1174 секунд, 1425 секунды и 1818 секунд.

Отсюда можно определить скорости возникновения акустических событий после воздействия ИК импульса на алюминиевый стержень длиной 111мм, которые будут равны, соответственно – 0,096 мм/сек, 0,078 мм/сек и 0,061 мм/сек., т.е. в соотношении 1,57:1,26:1.

б) Результаты экспериментов с медью

С медным стержнем проведено 5 опытов. Перед первым опытом с воздействием ИК лазерного импульса на торец стержня, опыт «02», был произведен опыт с записью «нулевки» - (опыт #01), как и в опытах с алюминиевым стержнем. На рис 14 приводится общая картина событий всех опытов (кроме опыта #01) с воздействием ИК импульса. Обращает на себя внимание, что во всех этих опытах величина сигнала события очень мала, меньше 0,25 мВ.

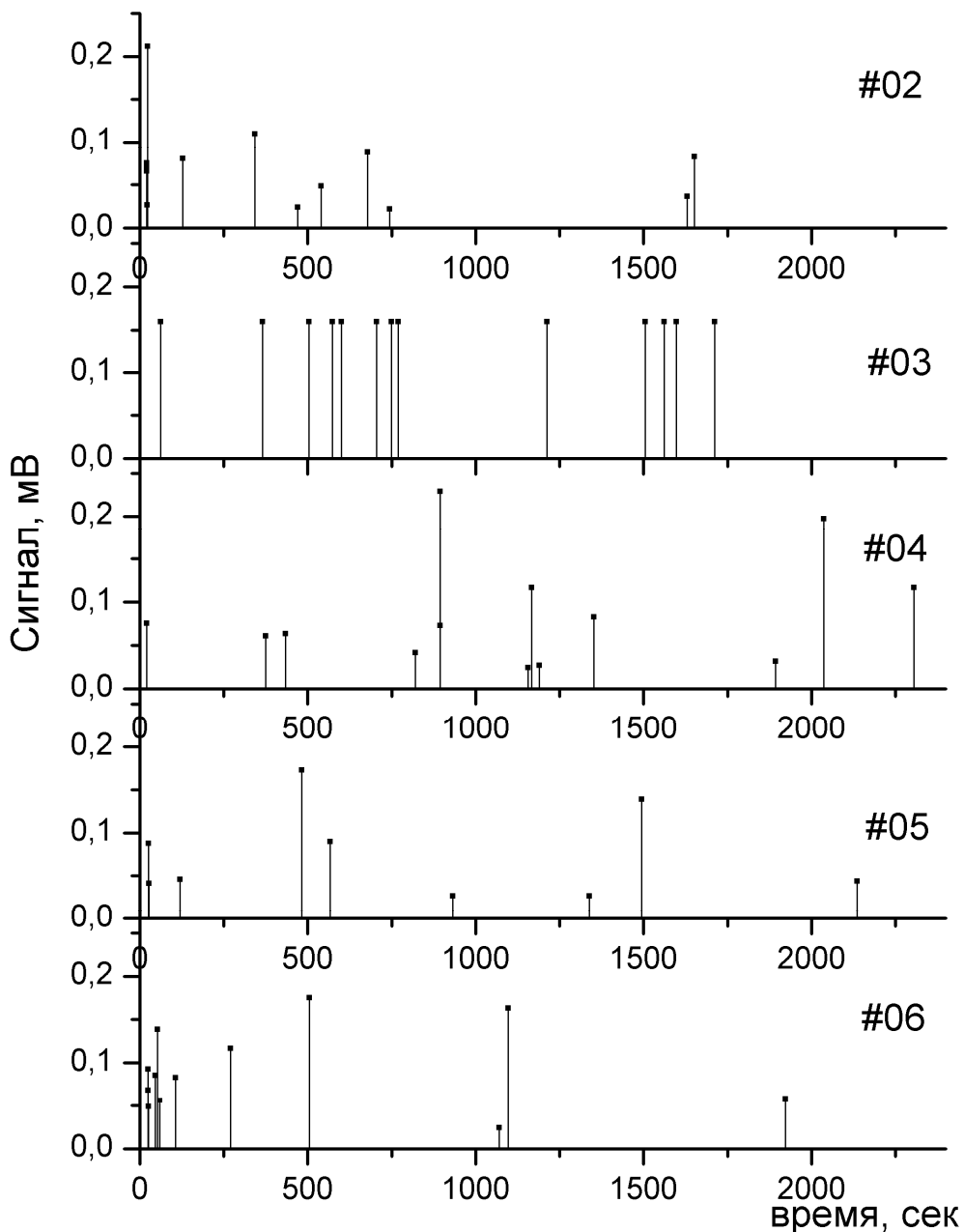


Рис.14. Общая картина событий в опытах с медью.

Как и в экспериментах с алюминием, в случае меди картина событий от опыта к опыту не повторяется, поэтому ниже будут рассмотрены некоторые характерные события в первом опыте с медью - #02. В качестве примеров приводятся данные на рисунках 15 и 16.

На рис. 15 приводятся данные акустической эмиссии в опыте #02 с медью события №8 на 22 ой секунде после ИК импульса, которые очень похожи на данные в случае алюминия (см. рисунки 11 - 13). Форма сигнала (рис.15А) не имела четко выраженного максимума с равномерно убывающим сигналом в начале спектра, при этом максимум амплитуды сигнала был $\sim 0,2$ мВ. Как уже выше отмечалось, событием АЭ считается акустический сигнал, если амплитуда максимума сигнала $>0,30$ мВ, события без высокочастотного “хвоста” и с небольшой амплитудой выше, можно отнести к акустическим шумам.

Почти во всех случаях в спектрах наблюдались «пички» сигналов, возникающие периодически с тем же периодом, что и в экспериментах с алюминием - через 1250, 2500 мкс и т.д., с максимальной амплитудой $< 0,001$ мВ. (см.рис.16).

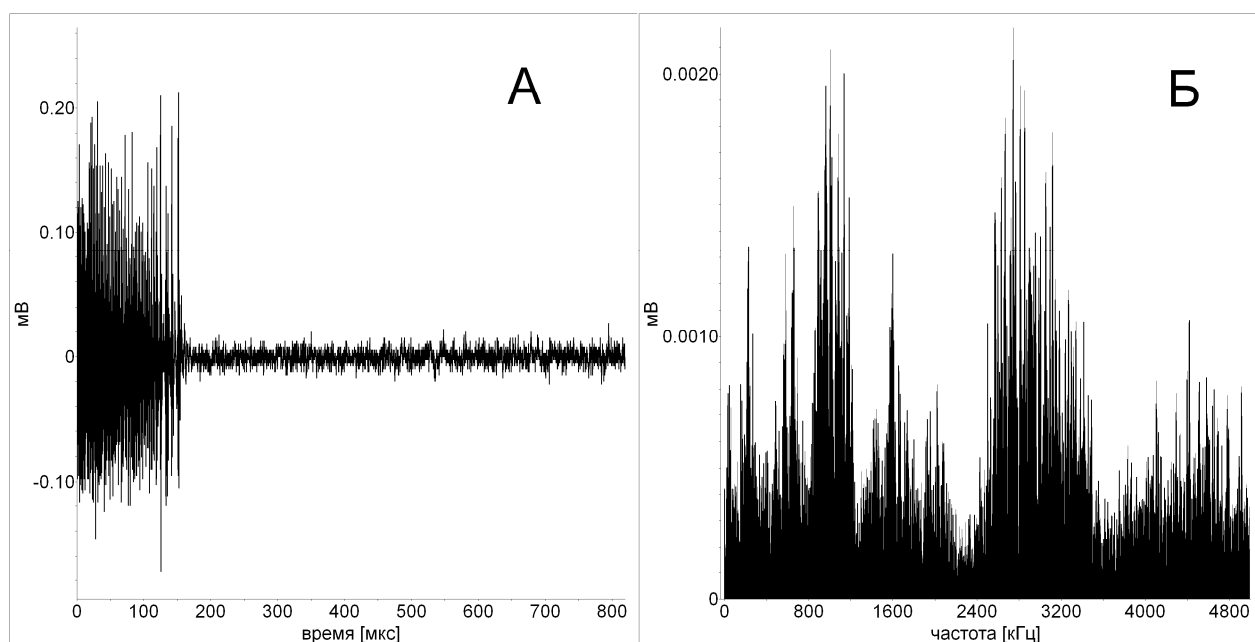


Рис. 15. Данные события на 22-секунде после ИК импульса. (Медь).

После наступления события №16 на 1641 секунде (27 мин. 21 сек.) в опыте #02 запись наблюдения велась еще 30 минут – никаких событий не возникало. Вид сигналов события №16 (опыт #02) с медью заслуживает внимания (рис.16).

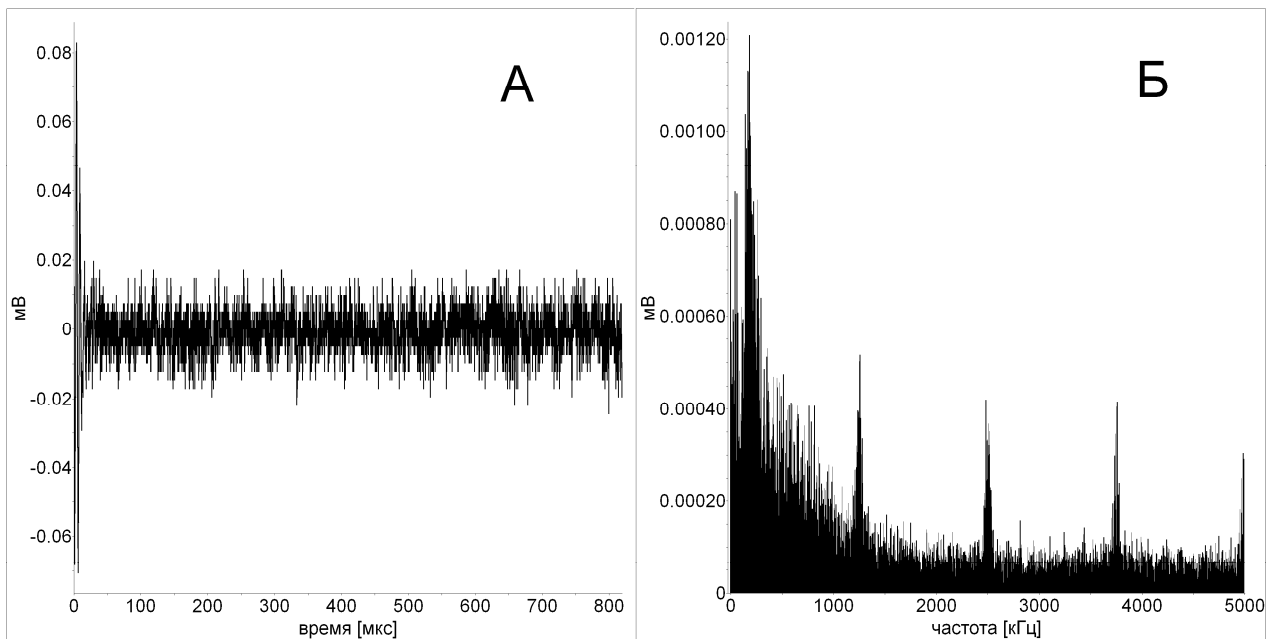


Рис. 16 Данные события №16 на 1641 секунде (медь)

В этом случае вид формы сигнала события похож на форму сигнала события в опытах с алюминием (см., например, рис.6), но в случае меди амплитуда сигнала маленькая, меньше 0,08 мВ., поэтому отнести этот сигнал к событию, обусловленному ИК воздействием, нельзя.

Во всех последующих опытах с медью после первого (#02) картина вида сигналов почти одинаковая. Везде наблюдаются резонансные частоты. Для примера на рис.17 приведены данные события №12 в опыте #03 на 2036 секунде (33 мин 56 сек.).

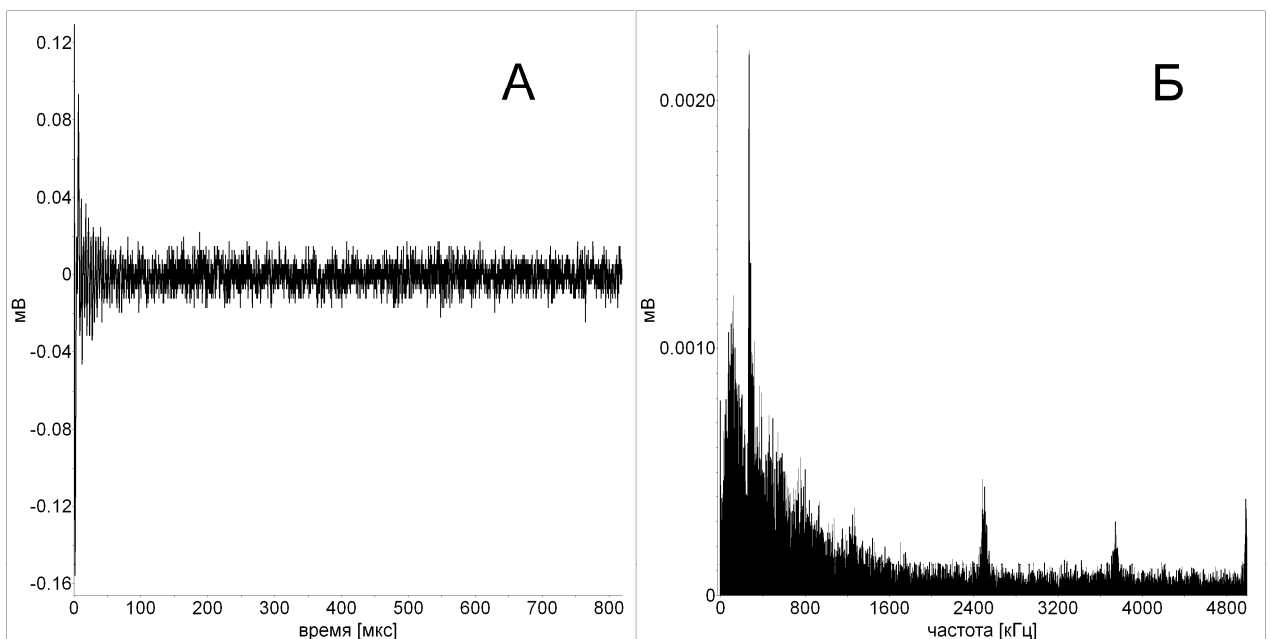


Рис.17. Данные события №12 на 2036 секунде (опыт #03, медь).

Форма сигнала на рис.17 похожа на данные в опыте #02 для меди (рис.16) и на рис.6 для алюминия, но максимум в спектре в случае меди на большей частоте, около 300 кГц.

Акустические события с маленькими амплитудами, «акустические шумы», наблюдаемые в опытах с медью, а также и с алюминием, частично можно объяснить возникновением микротрещин, движением мелких дислокаций при их отрыве или торможении.

Особенно интересны данные в случае меди для события №8 в опыте #05 на 1494 секунде (24 мин. 54 сек.), представленные на рис.18. Акустическое событие происходит в моменты времени ~100 мкс, ~200мкс, затем с уменьшающимся периодом и амплитудой до момента ~500мкс и затем с относительно большими амплитудами сигналов в период времени 650-800 микросекунд. Спектр имеет четко выраженную структуру в области 100-200 кГц. Следует заметить, что событие №8 происходило без накопления энергии. Возможно, оно отражало какой-то сложный процесс в металле с суммарной сравнительно большой энергией (например, образование и перемещение дислокации, т.п.), рассеиваемой на сравнительно более мелких изменениях в решетке металла.

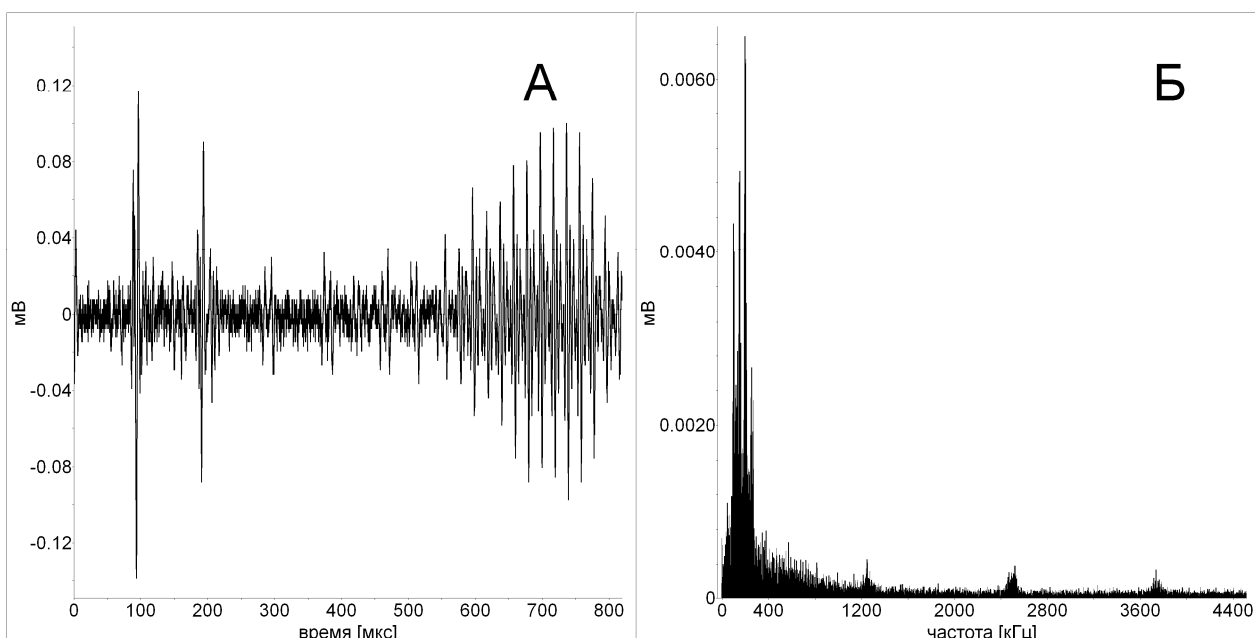


Рис.18. Данные события №8 на 1494 секунде (опыт #05, медь).

Как уже отмечалось выше, общие картины возникновения акустических событий от опыта к опыту не повторяются в случае меди, как и в случае с

алюминием. Так это и должно было быть согласно эффекту Кайзера, так как опыты с медным стержнем производились один за другим в один и тот же день, без каких либо перемещений образцов между опытами или воздействий на них.

Итак, в случае меди ни одно из наблюдаемых акустических событий нельзя связать с непосредственным воздействием ИК импульса.

Выводы

На основании анализа результатов проведенных исследований акустической эмиссии стержней алюминия и меди, один из торцов которых облучался ИК импульсом CO₂ лазера, можно сделать следующие выводы.

- Облучение вызывает локальное воздействие, порождающее механическую волну напряжения, в результате чего наблюдается акустическая эмиссия. Особенно четко это проявлялось в акустических опытах с алюминиевым стержнем, при которых было отмечено явно три акустических события, являющихся результатом непосредственного воздействия ИК импульса, возникших через 1174 секунд (19 мин. 34сек), 1425 секунд (23 мин. 45сек) и 1818 секунд (30 мин. 18сек) после включения ИК импульса.

- В опытах с медью явных акустических событий, обусловленных непосредственным действием ИК импульса, не выявлено. Вероятнее всего, это связано с тем, что у меди коэффициент затухания акустических волн существенно больше, чем у алюминия, т.е. следует иметь в виду различие в акустических характеристиках и физических свойствах исследуемых металлов, так, например, и плотность меди (8,96 г/см³) больше плотности алюминия (2,69 г/см³). Возможно, для наблюдения эффекта непосредственного воздействия ИК импульса в случае меди необходимы большая мощность импульса ИК и образец в виде более короткого стержня, чем в проводимых в настоящей работе экспериментах.

- В случае меди, как и в случае алюминия, наблюдаются акустические шумы и события со сравнительно небольшими амплитудами сигналов, которые вероятнее всего связаны с образованием и перемещением дислокаций в металле и электронными шумами измерительной аппаратуры.

- Проведенные акустические эксперименты в настоящей работе подтвердили выполнимость эффекта Кайзера – «невоспроизводимость акустической эмиссии при повторном ее возбуждении в опытах через малые промежутки времени», т.е. в случае, когда каждый последующий опыт после первого опыта производился

без отжига образца и прочих воздействий на него с возможным нарушением состояния структуры в результате предыдущего воздействия.

Литература

1. E. Kudriavtsev, S. Zotov, V. Krivov, Yu. Rybalko, E. Lotkova. "Reflection and conductance wave in NdCeCuO after IR laser irradiation", Material Research Society Fall'92 - meeting. Book of abstracts, H3.25, Boston, USA, (1992).
2. Е.М. Кудрявцев, Скорость распространения волны отражения и проводимости в различных типах твердых тел, Препринт №4, ФИАН, (1997), 20 с.
3. Е.М.Кудрявцев, «Нелинейный волновой процесс солитонной природы (волна изменения отражения и проводимости) как средство для изучения структуры и свойств конденсированных сред», *Поверхность. Рентгеновские, синхротронные и нейтронные исследования.*, №8., с. 100-105, 2002.
4. С.Д.Зотов, О.М.Иваненко, В.В.Кривов, Е.М.Кудрявцев, Б.Г.Макеев, В.Г.Мицен, Ю.И.Рыбалко. "Изменение коэффициента отражения ВТСП-керамики NdCeCuO в видимой области спектра при воздействии импульса 16-18 мкм ИК излучения". *Квантовая электроника*, №8, с.725-728, 1996.
5. Г. Кольский. Волны напряжения в твердых телах. Изд. ИЛ, Москва, 1955. 192 с.
6. В.А. Грешников, Ю.Б.Дробот. Акустическая эмиссия. Издательство стандартов, Москва. 1976. 271 с.
7. С.Ф. Филоненко. Акустическая эмиссия. Киев. 1999. 304 с.

Подписано в печать 19.02.2013 г.
Формат 60x84/16. Заказ №7. Тираж 140 экз. П.л 1,25.
Отпечатано в РИИС ФИАН с оригинал-макета заказчика
119991 Москва, Ленинский проспект, 53. Тел. 499 783 3640