

УДК 53.096:548.4

М.В. КОРОВКИН, Ю.И. ГАЛАНОВ*****РАДИАЦИОННО-ИНДУЦИРОВАННАЯ РАДИОЧАСТОТНАЯ ЭЛЕКТРОМАГНИТНАЯ ЭМИССИЯ В ЩЕЛОЧНО-ГАЛОИДНЫХ КРИСТАЛЛАХ**

Показана взаимосвязь электронных и электронно-дырочных процессов с возникновением электромагнитной эмиссии в радиодиапазоне вследствие теплового или оптического инициирующего воздействия на щелочно-галогидные кристаллы (ЩГК), содержащие радиационные центры окраски. Генерирование сигналов электромагнитной эмиссии в данном случае обусловлено элементарными актами релаксации возбужденного состояния дефектных диэлектриков, определяющихся собственными свойствами электронно-дырочного взаимодействия в кристаллической матрице, а не всей излучающей системой зарядов в целом. Форма регистрируемых импульсов содержит временные и энергетические характеристики переходного процесса и отражает динамику электрических релаксационных процессов в кристаллических диэлектриках.

Ключевые слова: щелочно-галогидные кристаллы, центры окраски, термостимулированная люминесценция, фотостимулированная люминесценция, радиочастотная электромагнитная эмиссия.

Введение

Различные виды воздействия (механическое, тепловое, оптическое, радиационное) на неорганические диэлектрики вызывают в них релаксацию структурных дефектов и появление неравновесных физико-химических процессов, связанных с движением микрочарядов или перераспределением зарядовой плотности, которые сопровождаются возникновением электромагнитных полей.

Явление генерирования электромагнитного излучения в радиочастотном диапазоне (100 Гц – 50 МГц), которое сопровождается газовый разряд, обнаружено при адгезионно-когезионных процессах [1]. Строго говоря, термин «излучение» следует считать не совсем точным, поскольку регистрация электромагнитных эффектов как по электрической, так и по магнитной составляющей [2, 3] происходит на расстояниях много меньше длины волны излучения. Поэтому в дальнейшем термин «радиоизлучение» был заменен на термин «электромагнитная эмиссия» [4], под которой понимается электромагнитное поле в ближней зоне, изменяющееся в радиочастотном диапазоне.

Сопровождающиеся генерацией радиочастотной электромагнитной эмиссии (РЭМЭ) процессы стимулированной релаксации дефектной структуры, обусловленные накоплением и релаксацией объемного заряда в диэлектриках [5, 6], скачкообразным движением заряженных дислокаций в ионных кристаллах [7–10], полиморфными и фазовыми превращениями в различных материалах [11–13], в том числе и в жидких кристаллах [14], не связаны с разрушением кристалла. В этом случае характеристики РЭМЭ отражают временные и энергетические характеристики изменения элементарного релаксационного процесса, вызывающего электромагнитную эмиссию.

Электромагнитная эмиссия в радиодиапазоне регистрировалась также синхронно с появлением термостимулированной люминесценции в различных кристаллических диэлектриках [15–18], что позволило предполагать о существовании электронно-дырочных процессов генерации РЭМЭ.

Методика исследования

Для выделения преимущественного вклада электронно-дырочных рекомбинационных процессов проведены исследования радиочастотной электромагнитной эмиссии при нагревании (77...500 К) ЩГК (LiF, KBr, KCl:Tl, аддитивно-окрашенный KBr), облученных рентгеновскими лучами при температуре жидкого азота, а также при фотостимуляции, в том числе инфракрасным светом в области 1000–3000 нм через фильтр ИКС-2.

Регистрация импульсов РЭМЭ проводилась по электрической составляющей с помощью емкостного датчика, представляющего собой платиновые электроды, нанесенные по трафарету на поверхность кристалла методом катодного распыления [5]. Усиление сигналов осуществлялось широкополосным (до 50 МГц) усилителем УЗ-29, позволяющим регистрировать электрические

импульсы длительностью переднего фронта более 20 нс на экране осциллографа С8-12. Скорость счёта импульсов (dN/dT) определялась частотомером ЧЗ-57.

Экспериментальные результаты и их обсуждение

В процессе облучения ЦГК ионизирующим излучением происходят одновременно разнообразные процессы в электронной и ионной подсистеме кристалла. Наблюдаемая при этом высокая скорость счёта импульсов не позволяет выделить вклад отдельных рекомбинационных процессов в интегральную интенсивность РЭМЭ. После окончания облучения и выключения рентгеновского пучка скорость счёта импульсов РЭМЭ спадает до фоновых значений (рис. 1). Затухание электромагнитной эмиссии после прекращения облучения может быть связано с процессами туннельной рекомбинации электронных и дырочных центров окраски и (или) генетически связанных пар $\{Tl - V_k\}$ в кристаллах $KCl : Tl$ [19]. При освещении светом в видимой области спектра интенсивность электромагнитной эмиссии резко возрастает.

При нагревании кристаллов KBr , облученных рентгеновскими лучами при 80 К, наблюдается интенсивная термостимулированная люминесценция (ТСЛ), пики свечения которой совпадают с максимумами счёта импульсов РЭМЭ (рис. 2). Пик ТСЛ при 122 К обусловлен отжигом H_A -центров. Пик ТСЛ при 155 К является неэлементарным и обусловлен двумя перекрывающимися пиками: слабым 145 К, связанным с разрушением F' -центров, и сильным 157–160 К, обусловленным делокализацией V_k -центров с последующей их рекомбинацией с электронными центрами окраски. Пик ТСЛ при 215 К обусловлен разрушением V_F -центров, а пик 245 К связан с первой стадией разрушения V_4 -центров [20, 21].

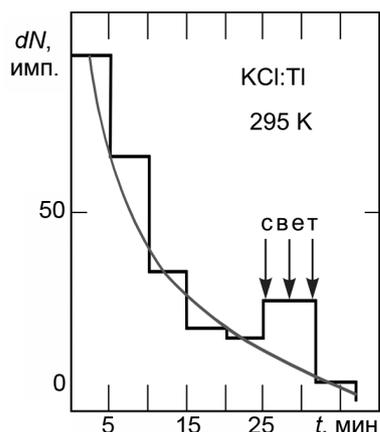


Рис. 1. Затухание интенсивности электромагнитной эмиссии после прекращения рентгеновского облучения кристаллов $KCl : Tl$ при 295 К

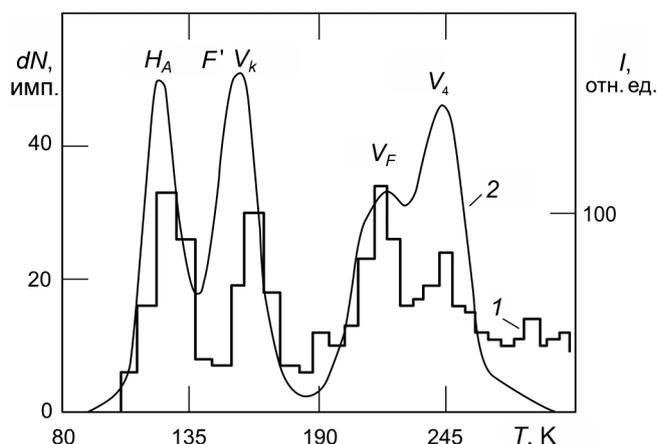


Рис. 2. Термостимулированная электромагнитная эмиссия и люминесценция кристаллов KBr , облученных при 80 К

Зависимость скорости счёта импульсов фотостимулированной электромагнитной эмиссии аддитивно окрашенного кристалла KBr представлена на рис. 3. В течение нескольких минут регистрировалась «фоновая» скорость счёта импульсов РЭМЭ; освещение при комнатной температуре образца инфракрасным светом вызывает резкое возрастание интенсивности электромагнитной эмиссии, а затем восстановление до уровня, предшествующего освещению (до уровня фона).

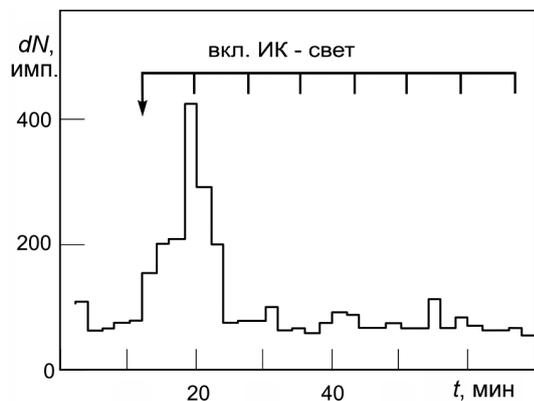


Рис. 3. Стимулированная ИК-светом электромагнитная эмиссия аддитивно-окрашенного кристалла KBr

В течение нескольких минут регистрировалась «фоновая» скорость счёта импульсов РЭМЭ; освещение при комнатной температуре образца инфракрасным светом вызывает резкое возрастание интенсивности электромагнитной эмиссии, а затем восстановление до уровня, предшествующего освещению (до уровня фона). В данном случае, в результате фотостимулированного разрушения мелких электронных ловушек, освободившиеся электроны рекомбинируют на анионных вакансиях с образованием $F^* \rightarrow F$ -центров. Затем этот процесс прекращается. Если осветить аддитивно-окрашенные кристаллы KBr в области F -полосы поглощения ($\lambda_{\max} = 640\text{ нм}$), то разрушение F -центров сопровождается заполнением мелких электронных ловушек, которые могут быть снова опустошены ИК-светом и наблюдаемый процесс генерации

РЭМЭ повторится. В данном случае наблюдаемая фотостимулированная электромагнитная эмиссия, по нашему мнению, связана непосредственно с электронными процессами и созданием F -центров через стадию релаксации их возбужденного состояния.

Поскольку движение электронов (или дырок) описывается моделью взаимодействия частицы с квантованным полем методами квантовой теории поля, то электронно-дырочные рекомбинационные процессы и связанные с ними электромагнитные явления также носят квантовый характер.

В отличие от индуцированных электромагнитных эффектов, квантовый характер которых определяется состоянием всей излучающей системы в целом [22], в данном случае генерирование фотостимулированной электромагнитной эмиссии определяется скорее параметрами элементарного излучателя, чем коллективными эффектами. Можно предположить, что ячейка, включающая в себя центр рекомбинации и область кристалла, определяемую сечением взаимодействия рекомбинирующих частиц, совершает переход из одного энергетического состояния в другое при акте рекомбинации. Такой переход будет сопровождаться перемещением зарядов из одних положений в другие и будет вызывать поляризацию кристаллической решетки. Генерирование импульса РЭМЭ, включающей в себя центр рекомбинации (см., например, рис. 4), в этом случае, вероятно, обусловлено изменением во времени дипольного момента $P_i(t)$ (дипольный момент i -й ячейки). Поскольку данный переход происходит в течение конечного времени, то во время перехода происходит изменение поляризации образца от значения P_i через максимум до нуля. Если бы все элементарные диполи двигались строго когерентно, то в этом случае эффект генерирования импульсной электромагнитной эмиссии был бы максимальным. Вероятно, это может быть достигнуто лишь в лазерах, работающих на центрах окраски, с помощью модуляции вынуждающего излучения.

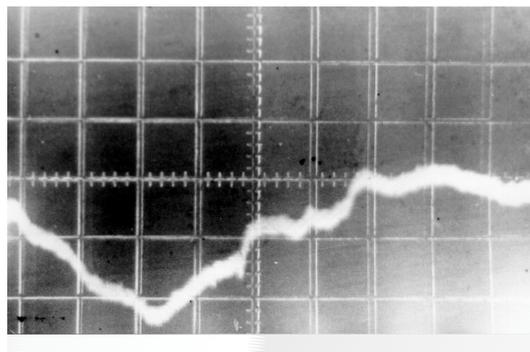


Рис. 4. Оциллограмма импульса электромагнитной эмиссии сложной формы, полученная при нагревании кристалла КВг, облученного при 80 К, в области $V_k - F$ -рекомбинации ($T \approx 160$ К, скорость развертки 1 мкс/дел., амплитуда 100 мкВ/дел.)

Многочисленными экспериментами по люминесценции в окрашенных кристаллах показано, что выше основного состояния имеется достаточно устойчивое (метастабильное) состояние, в которое переходит электрон в процессе колебательной релаксации – релаксированное возбужденное состояние (РВС), которое обладает большим радиусом, намного превышающим расстояние между ближайшими соседями в решетке [23, 24]. Время перехода из $2P^*$ -состояния в $1S^*$ -состояние (время жизни в РВС) вычислено для F -центров и составляет (в микросекундах) 0,59; 1,1 и 2,1 в кристаллах КС1, КВг и К1 соответственно [25]. Такова же, приблизительно, и длительность экспериментально регистрируемых импульсов РЭМЭ. Возможно, что генерирование радиочастотной электромагнитной эмиссии при релаксационных процессах в электронной подсистеме происходит на стадии перехода электронов из релаксированного возбужденного состояния в основное состояние.

Заключение

Преобразование и отжиг центров окраски при нагревании от 77 до 500 К облученных ионизирующим излучением ионных кристаллов, наряду с обесцвечиванием и люминесценцией кристалла, сопровождается радиочастотной электромагнитной эмиссией. Обнаружена фотостимулированная радиочастотная электромагнитная эмиссия при освещении видимым и ИК-светом радиационно- и аддитивно-окрашенных ЩГК. Рекомбинационная электромагнитная эмиссия, сопровождающая преобразование и отжиг центров окраски при фото- или термостимуляции, обусловлена электронно-дырочными рекомбинационными процессами и носит квантовый характер.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Тюрикова Л. А., Авербух Б. Г., Москвитин Н. И., Кротова Н. А. // Докл. АН СССР. – 1971. – Т. 201. – № 4. – С. 833–836.
2. Воробьев А. А., Завадовская Е. К., Сальников В. Н. // Докл. АН СССР. – 1975. – Т. 220. – № 1. – С. 82–85.

3. Финкель В.М., Головин Ю.И., Серeda В.Е. и др. // ФТТ. – 1975. – Т. 17. – Вып. 3. – С. 770–776.
4. Mechanochemistry and mechanoemission of solids / Abstracts of 11 Symposium. – USSR, Chernigov, 1990.
5. Коровкин М.В., Галанов Ю.И. // Изв. вузов. Физика. – 1989. – № 3. – С. 102–104.
6. Боев С.Г., Ушаков В.Я. Радиационное накопление заряда в твердых диэлектриках и методы его диагностики. – М.: Энергоиздат, 1991. – 240 с.
7. Косевич А.М., Маргвелашвили И.Г. // Изв. АН СССР. Сер. физич. – 1967. – Т. 31. – С. 848–850.
8. Хатиашвили Н.Г. // Письма в ЖТФ. – 1981. – Т. 7. – Вып. 18. – С. 1128–1132.
9. Головин Ю.И., Моргунов Р.Б., Жуликов С.Е. // Изв. РАН. Сер. физич. – 1997. – Т. 63. – № 5. – С. 965–971.
10. Коровкин М.В., Галанов Ю.И., Арефьев К.П. // Изв. вузов. Физика. – 1998. – № 11. – С. 124–126.
11. Воробьев А.А., Сальников В.Н., Завёрткин С.Д. // Изв. вузов. Физика. – 1975. – № 8. – С. 138–145.
12. Зильберман П.Ф. // Изв. АН СССР. Сер. Неорган. материалы. – 1985. – Т. 21. – № 1. – С. 157–158.
13. Бальмаков М.Д. // Физика и химия стекла. – 1987. – Т. 13. – № 5. – С. 781–784.
14. Аксельрод Е.Г., Добрин В.А., Заверткин С.Д. и др. // Письма в ЖТФ. – 1993. – Т. 19. – № 1. – С. 74–78.
15. Воробьев А.А., Сальников В.Н., Коровкин М.В. // Изв. вузов. Физика. – 1975. – № 7. – С. 59–64.
16. Коровкин М.В. // Актуальные проблемы фундаментальных наук: труды Второй Междунар. НТК. – М., 1994. – Т. 3 – С. А16–А19.
17. Коровкин М.В., Сальников В.Н. // Геология. Т. 2 / ред. кол. А.Н. Тихонов, В.А. Садовничий и др. (Программа «Университеты России»). – М.: Изд-во Моск. ун-та, 1995. – С. 200–204.
18. Ананьева Л.Г., Коровкин М.В. // Становление и развитие научных исследований в высшей школе: сб. трудов Междунар. науч. конф., посвященной 100-летию со дня рождения профессора А.А. Воробьева. Т. 2. – Томск: Изд-во Томского политехнического университета, 2009. – С. 457–461.
19. Аболтинь Д.Э., Витол И.К., Гринфельдс А.У. // Электронные и ионные процессы в ионных кристаллах. – Рига, 1980. – С. 132–142.
20. Круминьш В.Я., Бауманис Э.А. // Электронные и ионные процессы в ионных кристаллах. – Рига, 1976. – Вып. 5. – С. 91–100.
21. Алукер Э.Д., Лусис Д.Ю., Чернов С.А. Электронные возбуждения и радиoluminescence щелочно-галлоидных кристаллов. – Рига: Зинатне, 1979. – 252 с.
22. Файн В.М. // УФН. – 1953. – Т. 64. – № 5. – С. 273–313.
23. Ахманов С.А., Гадонас Р., Данелюс Р. и др. // Письма в ЖТФ. – 1981. – Т. 34. – Вып. 9. – С. 504–508.
24. Лахно В.Д., Балабаев Н.К. // Опт. и спектр. – 1983. – Т. 55. – № 2. – С. 308–312.
25. Bosi L., Bussolati C., Cova S. // Phys. Stat. Sol. (b). – 1972. – V. 50. – No. 1. – P. 311–318.

*Институт природных ресурсов Национального исследовательского
Томского политехнического университета, г. Томск, Россия

Поступила в редакцию 02.11.10.

**Физико-технический институт Национального исследовательского
Томского политехнического университета, г. Томск, Россия
E-mail: mvk@tpu.ru