

ПРОЦЕССЫ ФОРМИРОВАНИЯ СКРЫТОГО ИЗОБРАЖЕНИЯ В РАДИОГРАФИЧЕСКИХ ПЛЕНКАХ



ШАБЛОВ Станислав Владимирович

Канд. техн. наук,
ООО «АСК-РЕНТГЕН»,
Санкт-Петербург

В ярусах эмульсионного слоя радиографической пленки расположены изолированные в желатине микрокристаллы галогенида серебра [1, 2]. Наиболее распространенные формы таких микрокристаллов приведены на рис. 1 и 2.

Кристаллическая решетка микрокристалла Ag^+Br^- ионной структуры с кубической гранецентрированной формой представлена на рис. 3.

При рассмотрении процессов в кристаллических структурах следует обратить внимание, что перемещение атомов, ионов, электронов и положительных дырок в кристаллах может происходить за счет кулоновских сил, диффузии и сил межатомного взаимодействия. Кроме того, следует учитывать, что в кристаллах AgBr всегда находится некоторое количество свободных электронов, а также свободных ионов серебра Ag^+ , часть которых выходит на поверхность микрокристаллов.

В практике радиографического неразрушающего контроля при выполнении операций в радиационной пленочной дефектоскопии дефектоскописту важно отчетливо понимать, какие процессы происходят на начальных этапах формирования центров скрытого изображения (ЦСИ) в микрокристаллах галогенида серебра, находящихся в эмульсии радиографической пленки. Их знание позволяет обдуманно подходить к выбору типов пленочных систем, режимов просвечивания и применять меры по улучшению показателей чувствительности контроля. В статье описан процесс взаимодействия единичного фотона ионизирующего излучения с кристаллической решеткой микрокристалла и далее, переходя к экспозиции и количеству фотонов, необходимому для образования ЦСИ, поэтапно и наглядно представлен весь процесс формирования этих центров.

Также важно иметь в виду, что идеальный кристалл может существовать только при температуре абсолютного нуля. При любых других значениях температуры все реальные кристаллы несовершенны, т.е. в них наблюдаются нарушения идеального расположения атомов, называемые дефектами. Основными видами таких дефектов являются: примесные, точечные, линейные, поверхностные, объемные. Точечные дефекты охватывают

один-два структурных узла или междоузлия в элементарной ячейке:

- 1) вакансии, т.е. незаполненные узлы решетки (дефекты Шоттки);
- 2) атомы, молекулы или ионы, расположенные не на своих позициях или в междоузлиях (дефекты Френкеля).

Поверхностные дефекты включают в себя главным образом границы зерен. На границах кристаллическая решетка сильно ис-

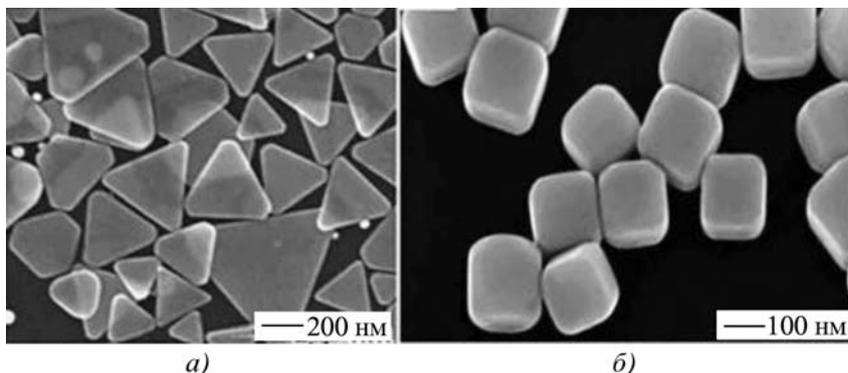


Рис. 1. Ярусы эмульсионного слоя пленки с микрокристаллами плоскостной (а) и кубической (б) форм

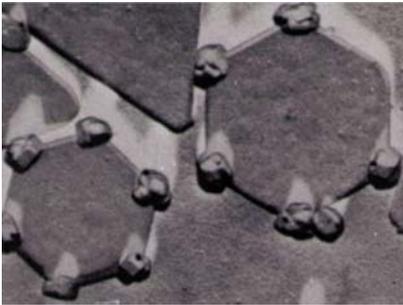


Рис. 2. Наращивание на поверхности микрокристалла эпитаксов различного галогидного состава, что приводит к значительному повышению общей чувствительности к излучению полученного композиционного кристалла

кажена возникающими дислокациями. Краевая дислокация обусловлена обрывами плоскости атомов, винтовая — взаимным сдвигом плоскостей решетки. Дислокации, выходящие на поверхность, например в виде ступеней, изломов или обрывов атомных рядов кристалла, обуславливают несовершенство поверхностей. Так как дефекты в ионных кристаллах несут на себе определенный заряд, то они играют важную роль при образовании потенциальных «ловушек» [3–5]. На рис. 4 показаны внутренние и краевые поверхностные кристаллические дефекты различной природы.

Теория скрытого изображения ученых Т.В. Grimley, N.F. Mott, R. Gerney [6, 7] исходит из подтвержденного факта, что в реакции $\text{AgBr} + h\nu$ образуются пары электрон–дырка. Электроны и дырки независимо друг от друга в разных местах кристалла AgBr улавливаются и нейтрализуются. Ловушками для образовавшихся фотоэлек-

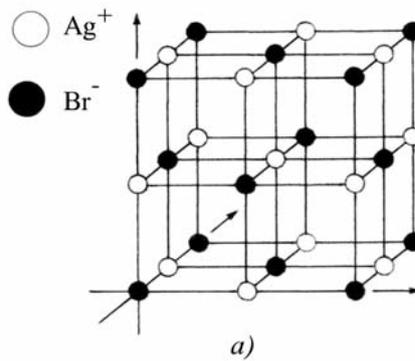
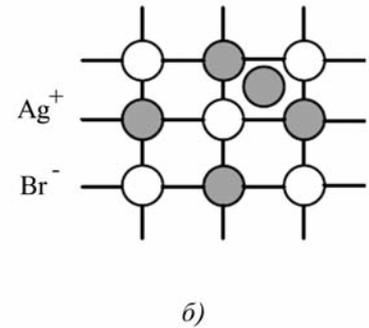


Рис. 3. Кристаллическая решетка микрокристалла Ag^+Br^- (а) и свободный ион серебра Ag^+ в межузельном пространстве кристалла (б)



тронов являются ионы серебра Ag^+ на углах и гранях микрокристаллов. Согласно этой теории, при поглощении кристаллом AgBr одного фотона образуется один электрон в зоне проводимости и дырка в валентной зоне. Часть электронов в зоне проводимости оседает на примесных поверхностных уровнях. Захваченные ловушками электроны взаимодействуют с межузельными свободными ионами Ag^+ , образуя на месте ловушки нейтральный атом Ag с малым временем жизни (до нескольких секунд). При повторении процесса на одном и том же месте образуется кластер из двух атомов Ag , время жизни которого определяется уже несколькими днями. Когда кластер разрастается до трех–четырех или более атомов, можно считать, что получено устойчивое скрытое изображение, пригодное для химического проявления, что особенно важно учитывать при выполнении практических работ по дефектоскопии [8, 9].

Теория Митчела (John Wesley Mitchell, 1957) также основана на представлении об образовании электронно-дырочных пар. По этой теории предполагается, что сначала межузельный Ag^- улавливается дефектом кристалла в решетке или на поверхности [3, 8]. Затем этот ион нейтрализуется электроном, и процесс повторяется до образования устойчивого скрытого изображения. В данном случае для дальнейшего рассмотрения несущественно, присоединяется ли ловушка к подвижному иону Ag^- или же, наоборот, ловушка движется к иону. Существенную роль в этом процессе играет электронно-дырочная схема перемещения зарядов и ионов.

Рассмотрим поэтапно процесс формирования центра чувствительности (ЦЧ) и его преобразование в центр скрытого изображения (ЦИ).

1. При попадании фотона излучения в кристаллическую решетку микрокристалла Ag^+Br^- происходит поглощение фо-

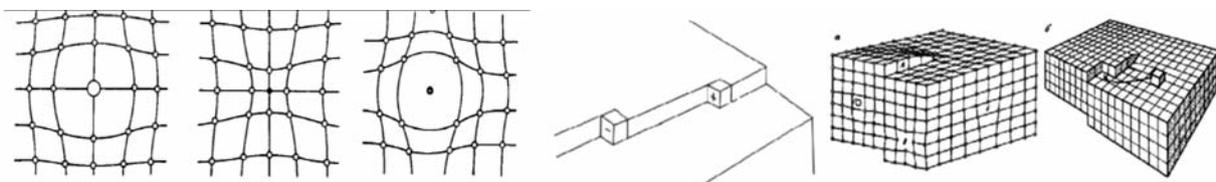


Рис. 4. Внутренние и поверхностные кристаллические дефекты

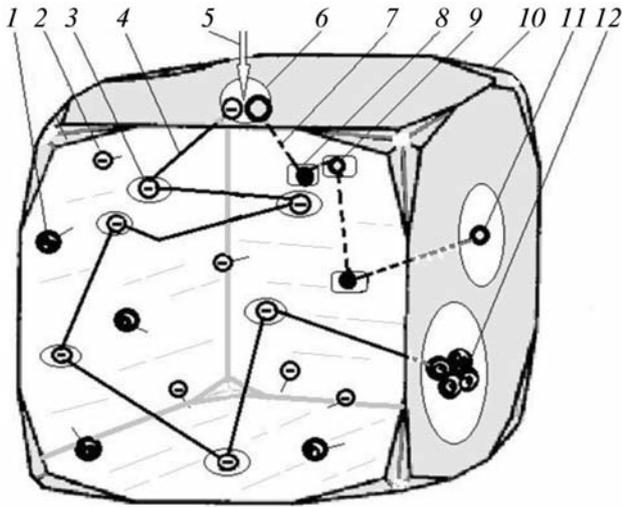
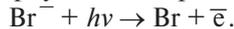


Рис. 5. Схема формирования центра скрытого изображения в микрокристалле:

1 — свободные положительные ионы серебра, не связанные в кристаллической решетке; 2 — электроны междуузельного пространства микрокристалла галогенида серебра; 3 — фотоэлектрон, временно находящийся в потенциальной ловушке; 4 — траектория фотоэлектрона, выбитого фотоном излучения из отрицательного иона брома на этапе трека электронной проводимости (сплошная линия); 5 — фотон излучения $h\nu$, взаимодействующий с ионом брома, находящимся в решетке микрокристалла (образование «положительной дырки» и свободного электрона); 6 — ион брома, взаимодействующий с излучением; 7 — траектория перемещения брома на этапе ионной проводимости (пунктир); 8, 9 — рекомбинация ионов и атомов брома в потенциальной яме (в ловушках) при их этапном перемещении в микрокристалле; 10 — тело микрокристалла AgBr кубической формы со скругленными гранями; 11 — атом брома, вышедший на поверхность микрокристалла и связанный желатиной; 12 — формирование в потенциальной яме центра чувствительности центра скрытого изображения (не менее четырех нейтральных атомов Ag) из положительных ионов серебра и электронов трека проводимости

тона излучения отрицательным ионом брома Br^- .

2. Внутренний фотоэффект. Поглощенный квант освобождает фотоэлектрон из оболочки отрицательного иона брома Br^- , образуя «положительную дырку» — атом брома:



3. В полосе электронной проводимости выбитый электрон последовательно попадает в «потенциальные ямы» и в итоге оседает в одной из наиболее глубоких, которые в большой степени вероятны на поверхности микрокристалла галогенида.
4. Электрон заряжает «потенциальную яму» (кристаллический дефект) отрицательным потенциалом и таким образом образует центр чувствительности.
5. Свободный положительный ион серебра из «межузельного» расположения решетки притягивается отрицательным зарядом центра чувствительности и присоединяет там электрон, образуя нейтральный атом серебра:

$$\text{Ag}^+ + \bar{e} \rightarrow \text{Ag}.$$
6. Формирование центра скрытого изображения в большинстве случаев возникает в кластерах на поверхности микрокристаллов, где расположены дефекты решетки в виде ступеней и изломов, представляющих собой поверхностные ловушки.
7. Предполагается, что при наличии в таком кластере — центре чувствительности числа нейтральных атомов серебра Ag^0 в количестве не менее четырех такой кластер приобретает свойства центра скрытого изображения ЦСИ, способного к химическому проявлению.

8. Отрицательный ион брома — «положительная дырка», отдав электрон, выбитый на первом этапе при фотоэффекте, по условиям ионной проводимости, последовательно и многократно обменивается электронами с находящимися ближайшими ионами и атомами и, становясь то ионом, то атомом, достигает поверхности микрокристалла в виде атома.
9. Положительные «дырки» и положительные ионы серебра в процессе перемещения по энергетическим ловушкам микрокристалла испытывают конкуренцию за нейтрализацию электрона в центре чувствительности — «потенциальной яме».
10. При выходе под воздействием сил межатомного взаимодействия за пределы микрокристалла нейтрализованный свободными электронами атом брома Br^0 связывается желатиновой средой эмульсионного слоя, а при фотообработке на стадии фиксирования будет удален: $\text{Br}^0 \rightarrow \infty$.

Процесс формирования в микрокристалле AgBr центра скрытого изображения на его поверхности схематически показан на рис. 5.

На рис. 6 представлен алгоритм формирования центра скрытого изображения в микрокристалле, а на рис. 7 показана схема его формирования.

Разбалансирование описанных процессов, например неверный выбор экспозиции, температурного режима и пр., может привести к недостатку или образованию излишнего количества свободных электронов и ЦСИ, которые вызовут рост оптической плотности эмульсии, непропорциональный интенсивности радиационного изображения, а также ускоренный рост вуали и образование других артефактов [2, 10].

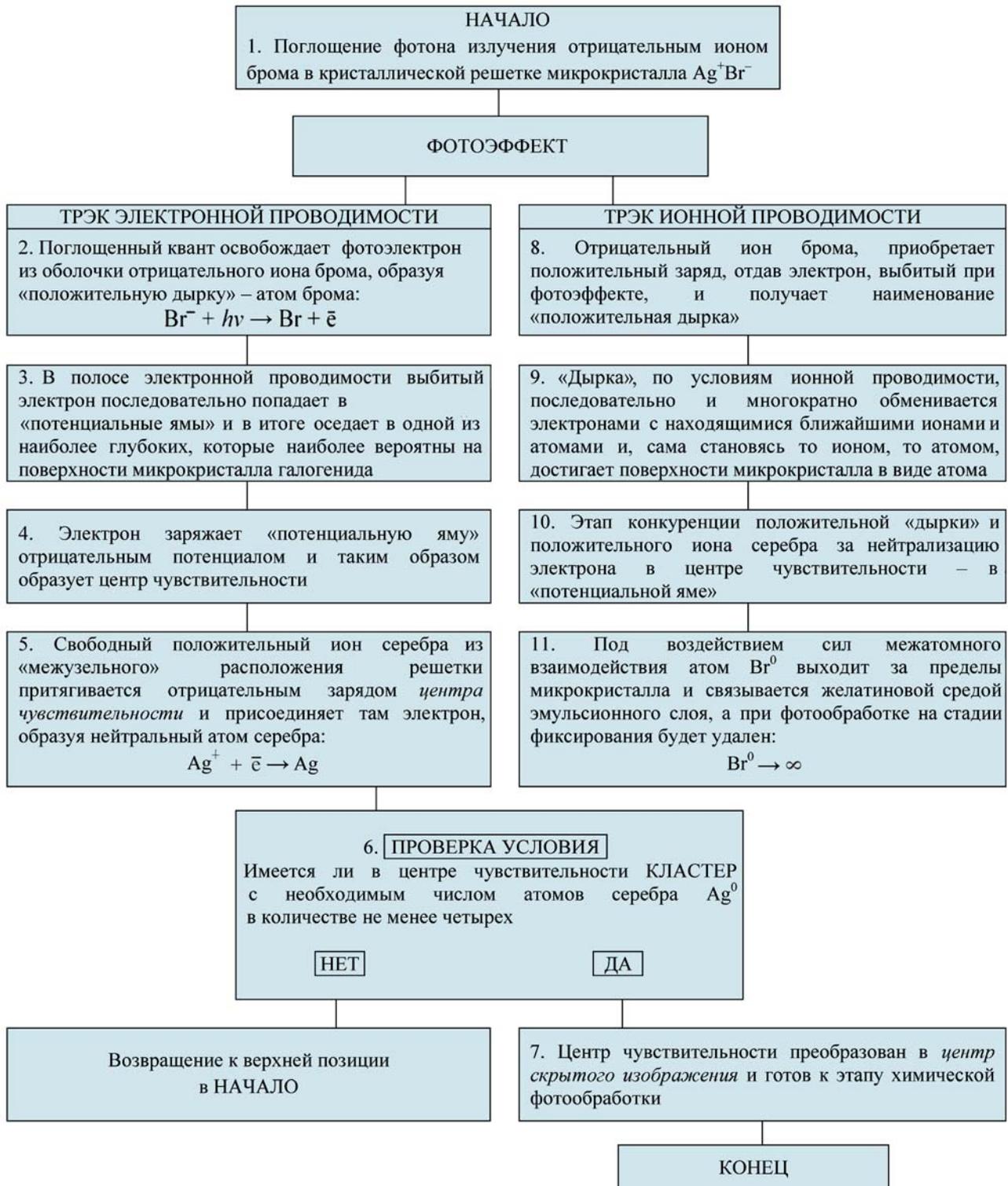


Рис. 6. Алгоритм формирования центра скрытого изображения

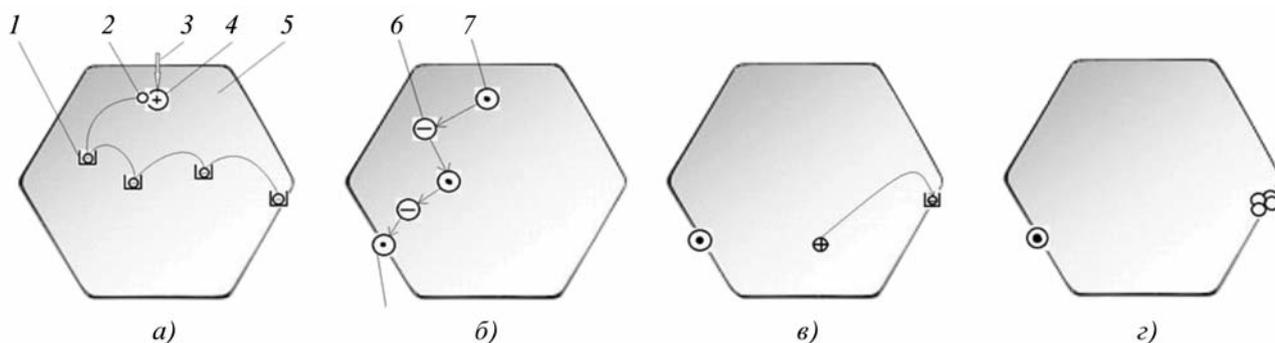


Рис. 7. Формирование центра скрытого изображения в микрокристалле галогенидосеребряной радиографической эмульсии [7]:

1 – электрон, попавший в 1-ю ловушку; 2 – электрон, выбитый из атома брома; 3 – фотон, выбивающий фотоэлектрон из атома брома; 4 – ион брома, потерявший электрон; 5 – микрокристалл эмульсии; 6 – отрицательный ион брома, участвующий в «эстафете» обмена атомов Br^0 на ионы брома $Br^- \rightarrow Br^0 \rightarrow Br^- \rightarrow Br^0$ и т.д.; 7 – атом брома Br^0 , находящийся в указанном на рисунке месте в начале «эстафеты»; а – перемещение электрона в ловушках по микрокристаллу и выход его на поверхность; б – эстафетный обмен атомов Br^0 с ионами брома: $Br^- \rightarrow Br^0 \rightarrow Br^- \rightarrow Br^0$; в – слева направо: атом Br^0 , связанный в желатине; ион Ag^+ , перемещающийся к электрону; электрон в ловушке на поверхности микрокристалла, ожидающий прихода иона Ag^+ ; г – центр скрытого изображения, образованный из четырех атомов металлического серебра Ag^0

Библиографический список

1. Колесников Л.В., Милешин И.В., Звиденцова Н.С. Фотоэмиссионные свойства однородных и композиционных микрокристаллов галогенидов серебра // ЖНИПФ. 1999. Т. 44, № 5. С. 11–18.
2. Шаблов С.В., Белобородов Н.В., Иваненко Л.А. Природа происхождения артефактов на радиографических снимках с галогенидосеребряными эмульсиями // В мире НК. 2020. Т. 23, № 2. С. 52–67.
3. Миз К., Джеймс Т.Х. Теория фотографического процесса. Л.: Химия, 1973. 576 с.
4. Ципинова А. Х., Шериева Э.Х. Оценка оптимального размера плоских микрокристаллов галогенида серебра для повышения светочувствительности и разрешающей способности фотопленок // Прикладная физика. 2018. № 5. С. 77–81.
5. Мейкляр П.В. Скрытое фотографическое изображение // Успехи физических наук. 1949. Т. XXXVIII, Вып. 1. С. 43–76.
6. Gurney R.W., Mott N.F. Electronic processes in ionic crystals. N.Y.: Oxford University Press, 1940. 232 p.
7. Мотт Н., Герни Р. Электронные процессы в ионных кристаллах / пер. под ред. и с предисл. акад. А.Ф. Иоффе. М.: Иностран. лит., 1950. 304 с.
8. Рентгенотехника: справочник: в 2 кн. / под ред. В.В. Ключева. 2-е изд., перераб. и доп. М.: Машиностроение, 1992. 480 с.
9. Halmshaw R. Industrial Radiography. Mortsel: AGFA-GEVAERT N.V., 1986. 158 p.
10. Румянцев С.В., Штань А.С., Гольцев В.А. Справочник по радиационным методам неразрушающего контроля. М.: Энергоиздат, 1982. 210 с.

ЖУРНАЛ «ТЕРРИТОРИЯ NDT»

У нашей ТЕРРИТОРИИ нет границ – попасть на нее можно ИЗ ЛЮБОЙ ТОЧКИ МИРА.
Наша ТЕРРИТОРИЯ – это ОБЪЕМ и ПРОСТОР информации в области НК.



В свободном доступе
НА САЙТЕ
www.tndt.idspektr.ru



СВЕЖИЙ НОМЕР
журнала
[http://tndt.idspektr.ru/
index.php/current-issue](http://tndt.idspektr.ru/index.php/current-issue)



АРХИВЫ номеров
за 10 лет
[http://tndt.idspektr.ru/
index.php/archive](http://tndt.idspektr.ru/index.php/archive)

Редакция: +7 (499) 393-30-25 • tndt@idspektr.ru