

ВЛИЯНИЕ РАДИАЦИОННОЙ ОБРАБОТКИ НА ЧУВСТВИТЕЛЬНОСТЬ АЗИДА СЕРЕБРА

Э. Д. Алукер, Д. Э. Алукер, Д. Р. Нурмухаметов, В. Н. Швайко

Кемеровский государственный университет, 650043 Кемерово, lira@kemsu.ru

Предложена методика исследования влияния радиационной обработки на чувствительность энергетических материалов, основанная на облучении образца серией импульсов электронного ускорителя. Представлены результаты экспериментов на примере азида серебра. Показано, что зависимость вероятности взрыва от дозы предварительного облучения немонотонна: рост в области малых доз и падение при больших дозах. Полученные экспериментальные результаты согласуются с дивакансионной моделью инициирования азидов тяжелых металлов.

Ключевые слова: азид серебра, чувствительность к взрыву, электронный ускоритель.

ВВЕДЕНИЕ

В [1] была предложена модель инициирования азидов тяжелых металлов (АТМ), согласно которой условием возникновения цепной реакции взрывного разложения является создание иницирующим импульсом достаточной концентрации активных центров, представляющих собой дивакансии, захватившие электрон (заряженные дивакансии). Согласно этой модели увеличение концентрации заряженных и нейтральных дивакансий повышает чувствительность образца, а увеличение интегрального сечения захвата дырки на конкурирующих дефектах — понижает. То есть предварительным воздействием на образец, приводящим к перезарядке существующих или созданию новых дефектов, можно управлять его чувствительностью.

Одним из наиболее эффективных методов перезарядки и создания дефектов является воздействие ионизирующих излучений — радиационная обработка [2, 3]. В связи с вышеизложенной задачей данной работы было проведение поисковых экспериментов, позволяющих дать экспериментально обоснованный ответ на вопрос о принципиальной возможности управления чувствительностью АТМ предварительной радиационной обработкой.

ОБОСНОВАНИЕ ВЫБОРА МЕТОДИКИ

Для дозированного введения радиационных дефектов обычно требуется получить

большой объем информации по дозовым зависимостям их накопления [2, 3]. Такая информация в более или менее полном виде имеется только для модельных систем (германий, кремний, галогениды щелочных металлов) [3, 4]. Для АТМ соответствующие данные практически отсутствуют. Поэтому единственным путем решения поставленной задачи является эмпирический подбор условий радиационной обработки.

В этом случае первостепенное значение приобретает вопрос трудоемкости эксперимента: необходимо выбрать подход, позволяющий получить достаточно определенный результат при использовании ограниченного числа исследуемых образцов. Если для инициирования использовать импульсы электронного ускорителя, то появляется интересная возможность использования одних и тех же импульсов как для обработки, так и для инициирования.

На поисковом этапе исследований наиболее «экономной» как с точки зрения использования образцов, так и с точки зрения трудозатрат представляется организация эксперимента с облучением образцов одной партии (одного синтеза) серией одинаковых импульсов и с фиксацией числа образцов, взорвавшихся в данном импульсе. Ясно, что зависимость числа взорвавшихся образцов от количества импульсов несет информацию о характере воздействия предыдущих импульсов на вероятность взрыва образца. Однако, поскольку статистические основы такого экспериментального подхода не разработаны, необходимо предварительно провести статистический анализ ситуации.

Начнем с простейшего случая. Имеется

Работа выполнена при поддержке Международного научно-технического центра (проект № 2180).

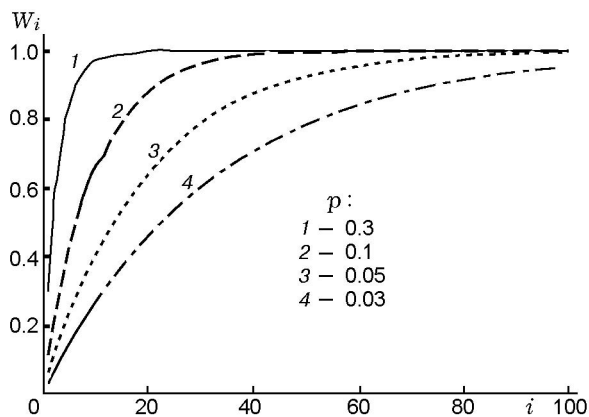


Рис. 1. Расчетные зависимости вероятности взрыва от числа инициирующих импульсов (при отсутствии влияния радиационной обработки на чувствительность) при различных значениях p

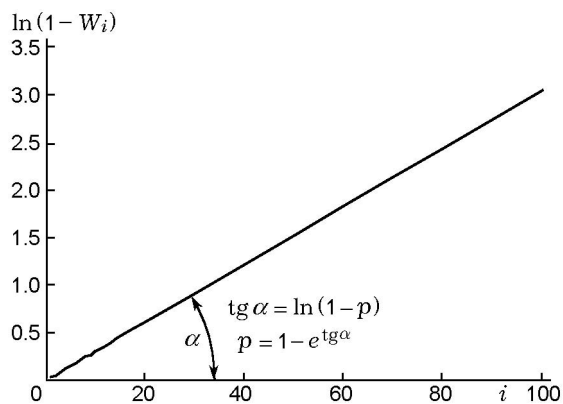


Рис. 2. Расчетная зависимость рис. 1 в координатах « $\ln(1 - W_i)$ — число инициирующих импульсов» при $p = 0.03$

партия абсолютно одинаковых образцов (n_0), вероятность взрыва которых (p) при воздействии импульса не меняется в результате воздействия предыдущих импульсов. Число взрывов в очередном импульсе n_i определяется следующим образом:

$$\begin{aligned} n_1 &= pn_0, \\ n_2 &= p(n_0 - n_1) = pn_0(1 - p), \\ n_3 &= p(n_0 - n_1 - n_2) = pn_0(1 - p)^2, \\ &\dots \\ n_i &= pn_0(1 - p)^{i-1}. \end{aligned} \quad (1)$$

Выгоднее оперировать не числом взрывов в i -м импульсе, а суммой взрывов в i импульсах:

$$N_i = \sum n_i. \quad (2)$$

Величина N_i больше, а следовательно, и флуктуирует меньше, чем n_i . Соответствующая система уравнений для суммы взрывов в i импульсах имеет вид:

$$\begin{aligned} N_1 &= n_1 = pn_0, \\ N_2 &= n_1 + n_2 = pn_0[1 + (1 - p)], \\ N_3 &= n_1 + n_2 + n_3 = pn_0[1 + (1 - p) + \\ &\quad + (1 - p)^2], \\ &\dots \\ N_i &= pn_0[1 + (1 - p) + (1 - p)^2 + \dots \\ &\quad \dots + (1 - p)^{i-1}] = n_0[1 - (1 - p)^i]. \end{aligned} \quad (3)$$

Вероятность взрыва за i импульсов определяется выражением

$$W_i = \frac{N_i}{n_0} = 1 - (1 - p)^i. \quad (4)$$

Зависимость (4) при различных значениях p представлена на рис. 1.

Для сравнения экспериментальных результатов с зависимостью (4) необходимо определить величину p . При большом количестве взрывов в первом импульсе n_1 можно воспользоваться очевидным соотношением

$$p = n_1/n_0. \quad (5)$$

Однако при малых n_1 из-за значительных флуктуаций выражение (5) практически неприменимо. В этом случае можно воспользоваться следующим приемом. Выражение (4) легко привести к виду

$$\ln(1 - W_i) = i \ln(1 - p). \quad (6)$$

Зависимость (6) представлена на рис. 2. Определение величины p по тангенсу угла наклона зависимости (6) от числа импульсов на рис. 2 дает статистически более обоснованный результат, чем «лобовое» использование выражения (5). Отклонение экспериментальных точек от расчетной кривой рис. 1 свидетельствует о влиянии предыдущих импульсов (в нашем случае радиационной обработки) на величину p , т. е. на чувствительность образца. В качестве количественной характеристики этого эффекта удобно взять отношение экспериментальных и расчетных значений вероятностей взрыва за i импульсов:

$$\gamma = W_{exp}/W_{calc}. \quad (7)$$

Следует, однако, обратить внимание на одно обстоятельство. Проведенное рассмотрение относится к случаю партии образцов с одинаковым значением p . Если же в пределах этой

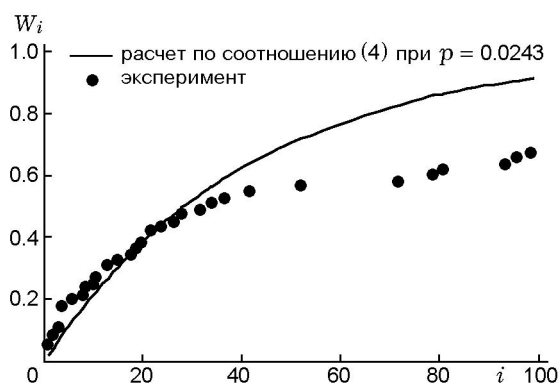


Рис. 3. Зависимость вероятности взрыва от числа инициирующих импульсов электронного ускорителя (доза в импульсе 15 крад)

партии наблюдается разброс p (более реалистический случай), то он также может приводить к отклонению экспериментальных точек от расчетной зависимости рис. 1. Оценить вклад этого фактора можно только при наличии дополнительной информации о конкретном эксперименте.

ОБЪЕКТЫ И МЕТОДИКА

Исследовались нитевидные кристаллы азида серебра с характерными размерами $0.1 \times 0.05 \times 10$ мм. Образцы отбирались из партии одного синтеза, близких геометрических размеров, прозрачные, без заметных макродефектов.

Образец помещали в вакуумную камеру и облучали импульсами электронного ускорителя (150 кэВ, 50 пс, 15 крад). Фиксировался номер импульса, при котором происходил взрыв. Если после подачи 100 импульсов образец не взрывался, эксперимент прекращали.

При проведении контрольных экспериментов в качестве источника инициирования использовался импульсный лазер (1064 нм, 30 пс, 0.5 мДж), а предварительное облучение осуществлялось электронами на установке «Арина».

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Результаты экспериментов представлены точками на рис. 3. По начальному участку этой кривой, используя выражение (6), определяли величину p , т. е. вероятность взрыва необлученных образцов (рис. 4). Полученное значение

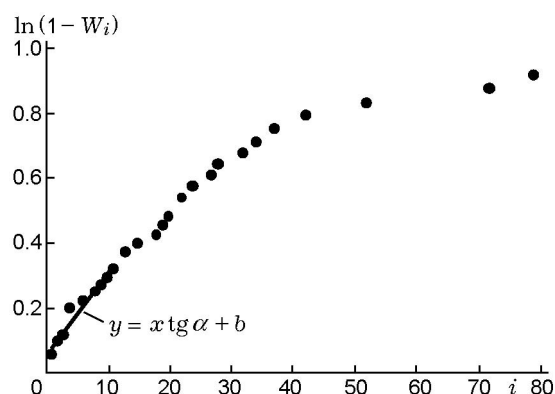


Рис. 4. Данные экспериментов, представленные на рис. 3, в координатах « $\ln(1 - W_i)$ — число инициирующих импульсов» (выражение (6)):

тангенс наклона начального участка дает значение $p = 0.0243$

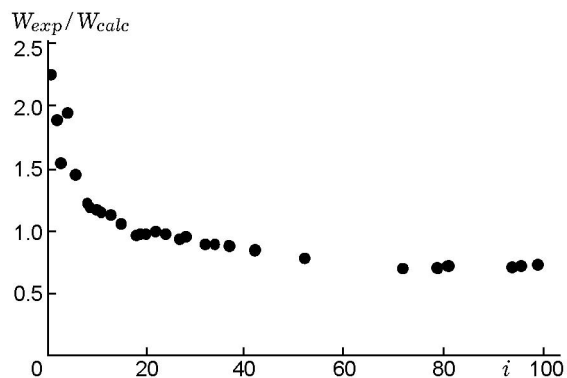


Рис. 5. Отношение экспериментальных и расчетных данных, представленных на рис. 3

p использовали для построения расчетной кривой на рис. 3.

Сравнение экспериментальной и расчетной кривых (см. рис. 3) показывает, что на начальном участке наблюдается незначительное увеличение вероятности взрыва с ростом дозы предварительного облучения, быстро сменяющееся уменьшением. Этот эффект наглядно иллюстрирует рис. 5.

Для получения количественной зависимости вероятности взрыва от дозы предварительного облучения (по данным рис. 3) использовалась следующая процедура. Кривая типа представленной на рис. 3 строилась начиная с i -го импульса, при этом предыдущие $i - 1$ импульсов играли роль предварительного облучения (радиационной обработки!). После этого для каждой кривой, аналогично рис. 4, определя-

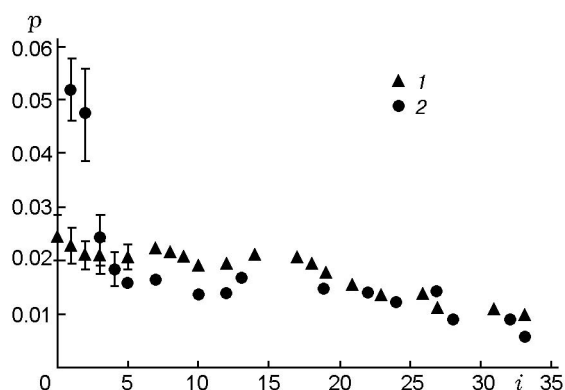


Рис. 6. Зависимость вероятности взрыва p от числа импульсов предварительной радиационной обработки электронным ускорителем (доза в импульсе 15 крад):

1 — предварительно не облученные образцы, 2 — образцы, предварительно облученные дозой 25 крад

лось начальное (для данного значения i) значение p_i . Результат применения описанной процедуры для различных i , т. е. для различных доз предварительного облучения, приведен на рис. 6 (точки 1). Видно, что общая тенденция — падение вероятности взрыва с увеличением дозы предварительного облучения.

Однако нельзя исключить и альтернативное объяснение наблюдаемого эффекта, о котором говорилось выше. В случае разброса чувствительности внутри партии образцов используемая методика может осуществлять некую «селекцию» по чувствительности: вначале взрываются образцы с большой чувствительностью, позднее — с меньшей. Этот эффект мог бы привести к качественно аналогичной картине. В связи с этим возникает необходимость в контрольном эксперименте, в котором селекция образцов по чувствительности была бы исключена.

В контрольном эксперименте использовалась стандартная методика — определение так называемой «частоты взрывов», т. е. подсчет числа взорвавшихся образцов при иницировании однократными импульсами. Иницирование осуществлялось лазерными импульсами (это позволило исключить дополнительные трудности, связанные с необходимостью учета «радиационной обработки» непосредственно во время иницирующего импульса). Предварительная радиационная обработка проводилась на установке «Арина» дозой 200 крад. Исследовалось 10 облученных и 10

необлученных образцов из одной партии, взорвалось 7 необлученных и 1 облученный образец. Обработка этих данных при помощи критерия χ^2 [5] показывает, что вероятность случайного появления такого результата, т. е. без влияния радиационной обработки, ниже 1 %. Следовательно, падение чувствительности определяется именно влиянием радиационной обработки*.

Для проверки статистической значимости начального участка кривой, представленной на рис. 3, 5, был проведен прямой эксперимент. Такое же количество образцов из той же партии, что и в предыдущих опытах, облучалось на установке «Арина» дозой 25 крад. После этого проводилась та же процедура, что и с предыдущей выборкой. Сравнение результатов эксперимента для этих двух выборок представлено на рис. 6. Наблюдается характерная картина: на начальном этапе величина p для облученных образцов больше, чем для необлученных (как и на рис. 3), а в дальнейшем результаты для обеих выборок совпадают.

Таким образом, влияние предварительного облучения на установке «Арина» сказывается только на начальном этапе, пока доза этого облучения меньше (или сравнима) дозы, накапливаемой при воздействии серией иницирующих импульсов ускорителя. Этот результат подтверждает реальность увеличения чувствительности при обработке малыми дозами.

ВЫВОДЫ

Экспериментально подтверждена возможность управления чувствительностью азидов серебра путем предварительной радиационной обработки. Зависимость чувствительности от дозы предварительного облучения имеет немонотонный характер: рост чувствительности в области малых доз и падение при больших дозах (см. рис. 6). С точки зрения предлагаемой модели иницирования [1] такая зависимость представляется достаточно логичной. При малых дозах преобладают эффекты перезарядки (захват электрона на дивакансию), приводящие к росту чувствительности. При больших дозах начинают сказываться эффекты, обусловленные радиационным созданием и аг-

*Количественное сопоставление данных, полученных при лазерном и электронном иницировании, в этом случае не имеет смысла из-за различия механизмов поглощения энергии.

регагизацией дефектов, которые могут приводить к увеличению интегрального сечения захвата дырки на конкурирующих дефектах, ведущему к падению чувствительности.

Такое соотношение дозовых зависимостей перезарядки и радиационного дефектообразования и агрегатизации хорошо известно в радиационной физике [3].

ЛИТЕРАТУРА

1. Адуев Б. П., Алукер Э. Д., Кречетов А. Г. Дивакансионная модель инициирования азидов тяжелых металлов // Физика горения и взрыва. 2004. Т. 40, № 2. С. 94–99.
2. **Lehmann Chr.** Interaction of radiation with solids and elementary defect production. New York; Oxford, 1977.
3. **Лущик Ч. Б., Лущик А. Ч.** Распад электронных возбуждений с образованием дефектов в твердых телах. М.: Наука, 1989.
4. **Вавилов В. С.** Действие излучения на полупроводники. М.: Гос. изд-во физ.-мат. лит., 1963.
5. **Шенк Х.** Теория инженерного эксперимента. М.: Мир, 1972.

Поступила в редакцию 20/X 2004 г.
