

Размножение электронных возбуждений в кристаллах AgCl

© Б.П. Адуев, Э.Д. Алукер, Б.А. Сечкарев, Е.В. Тупицин, В.М. Фомченко, В.Н. Швайко

Кемеровский государственный университет,
650043 Кемерово, Россия

E-mail: lira@kemsu.ru

(Поступила в Редакцию 19 сентября 2002 г.)

Исследовалась кинетика импульсной проводимости монокристаллов хлорида серебра при возбуждении тормозным рентгеновским излучением пикосекундной длительности в интервале температур 12–300 К. Обнаружено, что наблюдаемая в эксперименте концентрация электронов проводимости примерно в 2 раза превосходит концентрацию электронно-дырочных пар, создаваемых возбуждающим импульсом. Этот факт связан с цепным размножением зонных носителей заряда.

В нашей предыдущей работе [1] исследована кинетика импульсной проводимости монокристаллов AgBr в интервале температур 30–300 К при возбуждении импульсами тормозного рентгеновского излучения от ускорителя электронов. В [1] были обнаружены аномалии в импульсной проводимости AgBr, резко отличающие ее от импульсной проводимости классических ионных кристаллов [2–4].

1) Проводимость AgBr при пикосекундном возбуждении нарастает в течение 3 ns после окончания возбуждающего импульса.

2) Амплитуда импульса проводимости AgBr значительно (по крайней мере на два порядка) превышает амплитуду импульсов проводимости классических ионных кристаллов в аналогичных условиях.

3) Сопоставление импульсной проводимости при пикосекундном возбуждении с данными дозиметрических измерений показало, что число электронов, регистрируемых по проводимости, превышает число электронов, создаваемых в образце возбуждающим импульсом, почти на порядок.

Анализ обнаруженных аномалий показывает, что в AgBr идет неизвестный ранее процесс размножения электронных возбуждений, характерная длительность которого составляет $\sim 10^{-9}$ с.

В настоящей работе проведено исследование импульсной проводимости монокристаллов AgCl, который также используется в фотографии, с целью выяснения того, являются ли аномалии, обнаруженные в [1], специфическими для AgBr или они имеют общий характер для галогенидов серебра.

1. Объекты и методика

Объектом исследования служил монокристалл AgCl, выращенный методом Стокбаргера из сырья марки ОСЧ, предварительно очищенного зонной плавкой (50 проходов). Исследуемые образцы вырезались из монокристалла и шлифовкой доводились до толщины 100–130 μm . Электроды наносились методом проявления, позволяющим получить на поверхности образца однородную пленку серебра.

В качестве источника возбуждения использовался ускоритель электронов ГИН-540 с разрядником-обострителем и анодом из алюминиевой фольги толщиной 0.9 mm, которая полностью поглощала электронный пучок. Длительность импульса ~ 50 ps, максимальная энергия электронов ~ 200 keV. Использование в качестве анода алюминиевой фольги связано с тем, что нам не удалось довести толщину образца до $d < 50 \mu\text{m}$ для обеспечения однородности возбуждения электронным пучком. Поэтому возбуждение осуществлялось тормозным излучением, генерируемым при полном поглощении электронов алюминиевым анодом.

Импульс тока проводимости, возникающий в образце под воздействием тормозного рентгеновского излучения, регистрировался осциллографом С7-19. Функциональная схема измерительной установки подробно описана в [1]. Временное разрешение методики измерения составляет величину 150 ps. Измерения проводились в интервале температур 12–300 К. Для определения поглощенной дозы в образце за импульс возбуждения использовались термолюминесцентные дозиметры ТЛД-К на основе SiO₂. Методика расчета поглощенной дозы в образце приведена в [1].

Погрешность измерений амплитуды импульсов тока проводимости не хуже $\pm 10\%$, погрешность дозиметрических измерений равна $\pm 20\%$.

2. Экспериментальные результаты

Типичная осциллограмма импульса тока проводимости при 300 К приведена на рис. 1. Обращает на себя внимание то, что в AgCl, как и в AgBr [1], наблюдается инерционное нарастание (~ 2 ns) импульса тока проводимости, более чем на порядок превышающее временное разрешение тракта регистрации (0.15 ps). Эта закономерность сохраняется в интервале температур 12–300 К. Амплитуда импульса тока проводимости в одинаковых условиях эксперимента в 5 раз ниже, чем в AgBr, однако по крайней мере на порядок превышает таковую для щелочно-галогидных кристаллов и $\alpha\text{-Al}_2\text{O}_3$ [1–4].

Вольт-амперные характеристики (ВАХ) линейны, симметричны и не имеют каких-либо особенностей. По наклону ВАХ рассчитывалось сопротивление образцов

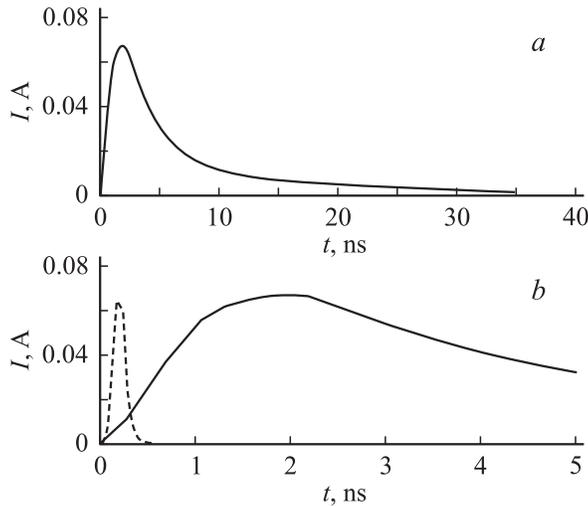


Рис. 1. Осциллограмма импульса тока проводимости для кристалла AgCl при 300 К. Развертка 10 (a) и 2.5 ns/div (b). Штриховая линия — импульс возбуждения.

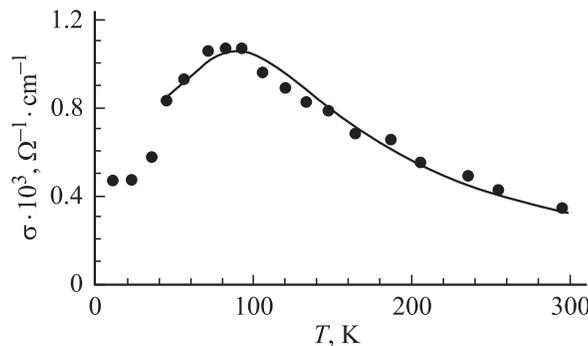


Рис. 2. Зависимость амплитуды проводимости от температуры для кристалла AgCl. Точки — экспериментальные данные, сплошная кривая — расчет по формуле (1) с учетом (2)–(5).

и с учетом их геометрических размеров определялась величина радиационно-стимулированной проводимости в максимуме импульса тока проводимости.

Рассчитанная таким образом зависимость амплитуды проводимости $\sigma(T)$, представленная на рис. 2, имеет немонотонный характер с максимумом при $T = 70$ К.

Обработка данных рис. 2 производилась по формуле

$$\sigma = ne\mu_d, \quad (1)$$

где n — концентрация электронов проводимости, создаваемая рентгеновским импульсом; e — заряд электрона; μ_d — дрейфовая подвижность. Характер температурной зависимости проводимости свидетельствует о наличии центров прилипания для электронов. В этом случае дрейфовая подвижность отличается от холловской μ_h и связана с ней выражением [5]

$$\mu_d = \mu_h \frac{1}{1 + \frac{q_1}{q_2} \frac{N}{N_c} e^{E/kT}}, \quad (2)$$

где E — энергетическое расстояние от ловушки до дна зоны проводимости; q_1, q_2 — статистические веса

полных и пустых ловушек соответственно, которые связаны следующим соотношением [5]:

$$q_1/q_2 = 2; \quad (3)$$

$N_c = 2(2\pi mkT/h^2)^{3/2}$ — эффективная плотность состояний вблизи дна зоны проводимости; эффективная масса электрона $m = 0.3m_0$ [5], поэтому величина N_c может быть представлена следующим выражением:

$$N_c = 7.9 \cdot 10^{14} T^{3/2}. \quad (4)$$

Холловская подвижность в интервале $T > 40$ К аппроксимировалась выражением [6]

$$\mu_h = 30 (e^{280/T} - 1) \text{ cm}^2/\text{V} \cdot \text{s}. \quad (5)$$

Сплошная кривая на рис. 2 рассчитана по формуле (1) с учетом (2)–(5) при следующих значениях параметров: $E = 0.02$ eV, $N = 6.9 \cdot 10^{16} \text{ cm}^{-3}$, масштабный коэффициент дает значение $n = 2.6 \cdot 10^{16} \text{ cm}^{-3}$. Из рис. 2 видно, что совпадение с экспериментом хорошее. Энергия активации E для центров прилипания совпадает с полученной в [5] в экспериментах по определению дрейфовой подвижности в AgCl с помощью времяпролетной методики. Природа центров прилипания не установлена. Предполагается, что они связаны с механическими дефектами, вносимыми при обработке образцов [5].

Следующая серия экспериментов проводилась при фиксированной температуре $T = 300$ К и варьировании плотности возбуждения, которое достигалось путем изменения расстояния между диодом ускорителя и образцом. Эксперимент был построен следующим образом. При фиксированном расстоянии между диодом и образцом измерялась проводимость кристалла. Использовалось усредненное значение по десяти импульсам. Далее на место образца устанавливались дозиметры и проводились измерение и расчет поглощенной дозы в образце D по методике, подробно описанной в [1]. Измерялось усредненное значение по десяти дозиметрам.

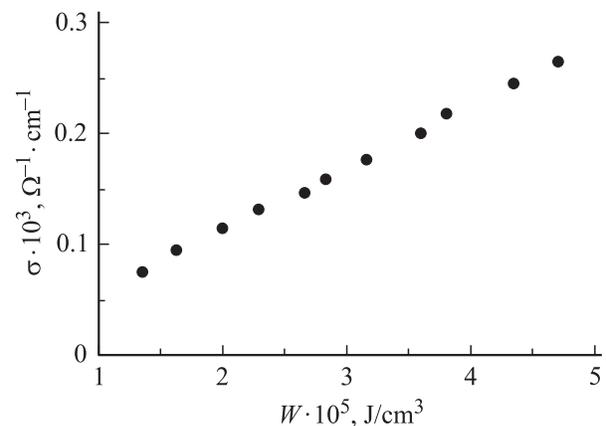


Рис. 3. Зависимость амплитуды проводимости от плотности поглощенной дозы для кристалла AgCl.

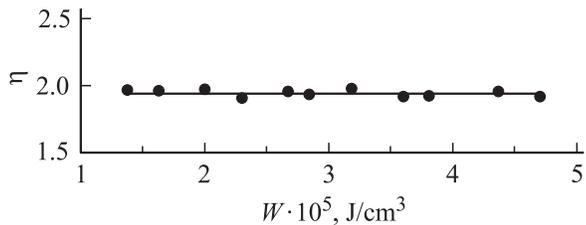


Рис. 4. Зависимость коэффициента размножения свободных носителей заряда от плотности поглощенной дозы для кристалла AgCl.

Плотность поглощенной дозы в образце рассчитывалась по формуле

$$W = D\rho, \quad (6)$$

где $\rho = 5.56 \text{ g/cm}^3$ — плотность для AgCl. Полученная экспериментальная зависимость представлена на рис. 3.

3. Обсуждение результатов

Как видно из представленных результатов, в AgCl наблюдаются аномалии, аналогичные обнаруженным в AgBr [1]: 1) нарастание импульса тока проводимости в течение $\sim 2 \text{ ns}$ после окончания импульса возбуждения; 2) аномально высокая амплитуда импульса проводимости (хотя этот эффект выражен менее ярко, чем в AgCl [1]).

Как указывалось в [1] и в начале данной работы, эти результаты позволяют предположить наличие размножения электронных возбуждений после окончания рентгеновского импульса. Представленные в предыдущем разделе экспериментальные данные позволяют рассчитать коэффициент размножения свободных носителей заряда η , который можно представить в виде

$$\eta = \frac{n}{n_g}, \quad (7)$$

где n — концентрация электронов, участвующих в проводимости, которую можно рассчитать по измеренной σ и формулам (1)–(5); n_g — концентрация электронно-дырочных пар, генерируемых импульсом возбуждения, которая обычно описывается выражением

$$n_g = \frac{W}{\varepsilon}, \quad (8)$$

где W — плотность энергии поглощенного излучения (см. (6) и рис. 3), ε — средняя энергия создания электронно-дырочной пары. При оценке последней величины для AgCl мы приняли экспериментальное значение $\varepsilon = 7.6 \text{ eV/pair}$ [7].

Результаты расчета с использованием данных рис. 3 представлены на рис. 4 и дают величину $\eta = 1.93 \pm 0.08$. Таким образом, мы как и в случае с AgBr, приходим к следующему выводу: наблюдаемая в эксперименте концентрация электронов проводимости примерно в 2 раза превосходит концентрацию, создаваемую возбуждающим импульсом, хотя этот эффект выражен менее ярко, чем в AgBr [1].

Таким образом, обнаруженные аномалии в импульсной проводимости галогенидов серебра свидетельствуют о наличии в этих системах процессов размножения электронных возбуждений, отличающегося от хорошо известного размножения за счет ударной ионизации, широко используемого в технике регистрации ядерных излучений (характерная длительность обнаруженного процесса $\sim 10^{-9} \text{ s}$, характерная длительность процессов за счет ударной ионизации $< 10^{-12} \text{ s}$). Возможно, что обнаруженное размножение носит цепной характер, аналогичный наблюдаемому ранее в азидах тяжелых металлов [8,9].

Отметим также, что количественное различие эффекта размножения электронных возбуждений для AgBr и AgCl находится в качественном согласии с различной фотографической чувствительностью этих материалов. Последнее свидетельствует в пользу того, что обнаруженный эффект связан с высоким выходом центров скрытого изображения и высокой фотографической чувствительностью галогенидов серебра.

Список литературы

- [1] Б.П. Адуев, Э.Д. Алукер, Н.Л. Алукер, Г.М. Белокуров, В.М. Фомченко, В.Н. Швайко. ЖНиПФ **45**, 3, 59 (2000).
- [2] Б.П. Адуев, В.Н. Швайко. ФТТ **41**, 7, 1200 (1999).
- [3] Б.П. Адуев, Э.Д. Алукер, В.М. Фомченко, В.Н. Швайко. ФТТ **43**, 7, 1185 (2001).
- [4] Б.П. Адуев, Э.Д. Алукер, В.Н. Швайко. ФТТ **39**, 11, 1995 (1997).
- [5] R. van Heyningen. Phys. Rev. **128**, 5, 2112 (1962).
- [6] П.В. Мейкляр. Физические процессы при образовании скрытого фотографического изображения. Наука, М. (1972). 399 с.
- [7] Э. Фюнфер, Г. Нейерт. Счетчики излучений. Гос. изд-во лит. в обл. атомной науки и техники, М. (1961). 404 с.
- [8] Б.П. Адуев, Э.Д. Алукер, Г.М. Белокуров, Ю.А. Захаров, А.Г. Кречетов. ЖЭТФ **116**, 5 (11), 1676 (1999).
- [9] В.Р. Адуев, Е.Д. Алукер, В.И. Krashenin, A.G. Krechetov, A.Yu. Mitrofanov. J. Appl. Phys. **89**, 7, 4156 (2001).