

ФИЗИКА ТВЕРДОГО ТЕЛА

УДК 621.315.592

**ВЛИЯНИЕ ПОДСВЕТКИ НА ИЗОТЕРМИЧЕСКУЮ РЕЛАКСАЦИЮ
ФОТОИНДУЦИРОВАННЫХ МЕТАСТАБИЛЬНЫХ СОСТОЯНИЙ
В ПЛЕНКАХ α -Si:H, СЛАБО ЛЕГИРОВАННЫХ БОРОМ****И.А. Курова, Н.Н. Ормонт, А.Л. Громадин***(кафедра физики полупроводников)*

Исследована кинетика темновой проводимости предварительно освещенных пленок α -Si:H, слабо легированных бором, после их изохронного отжига в темноте или при наличии слабой подсветки. Установлено, что релаксация медленных метастабильных состояний в условиях подсветки определяется не только термическим, но и фотоиндуцированным отжигом.

В работах [1–3] была исследована изотермическая темновая релаксация фотоиндуцированных метастабильных состояний (ФМС), созданных предварительным освещением легированных и слабо легированных пленок α -Si:H. Было установлено, что в результате освещения пленок при $T > 350$ К образуются два типа ФМС. Это определяет немонокотонную кинетику изменения темновой проводимости (ТП) $\sigma_d(t)$ при их релаксации: быстрое увеличение ТП, а затем медленное ее уменьшение до равновесного

(при данной температуре) значения σ_{d0} . Быстрый процесс обусловлен релаксацией метастабильных оборванных связей (МОС), а медленный — релаксацией метастабильных электрически активных атомов примеси или их комплексов (МЭАП). Немонотонное изменение $\sigma_d(t)$ при релаксации МОС и МЭАП связано с тем, что в пленках α -Si:H как n -, так и p -типа темновой уровень Ферми расположен между их энергетическими уровнями.

Известно, что кинетика изменения $\sigma_d(t)$ вследст-

вие изменения положения уровня Ферми $\Delta F(t)$ при релаксации МОС или МЭАП определяет кинетику изменения их концентрации при условии постоянства плотности состояний в запрещенной зоне в области смещения уровня Ферми [4]:

$$\ln \frac{\sigma_d(t)}{\sigma_{d0}} = \frac{\Delta F(t)}{kT} = \frac{N(t)}{kT \cdot \rho_0}. \quad (1)$$

Было установлено [1–3], что кинетика релаксации и МОС, и МЭАП описывается растянутыми экспонентами с разными параметрами:

$$N_i(t) = N_i(0) \exp \left\{ -(t/\tau_{0i})^{\beta_i} \right\}, \quad (2)$$

где значения $i = 1, 2$ относятся к релаксации МОС и МЭАП соответственно.

Релаксация метастабильных состояний с одним временем релаксации τ описывается простой экспонентой $N(t) = N(0) \exp(-t/\tau)$. Наличие растянутых экспонент для описания кинетики релаксации МОС и МЭАП означает, что релаксируют совокупности МОС и МЭАП (назовем их ансамблями) с полными начальными концентрациями $N_{1,2}(0)$ и функциями распределения по временам релаксации τ с максимумами при $\tau = \tau_{01,02}$. Эти ансамбли МОС и МЭАП имеют полуширины, характеризуемые обратными величинами параметров $\beta_{1,2}$ [5].

Исследование изотермической релаксации ансамблей МОС и МЭАП, образованных при разных температурах в течение одного и того же времени освещения, показали, что их эффективные времена релаксации экспоненциально зависят от температуры:

$$\tau_{0i} = \nu_i^{-1} \exp \left(\frac{E_{ai}}{kT} \right). \quad (3)$$

Здесь E_{ai} — эффективные энергии отжига ансамблей МОС и МЭАП, ν_i — частоты попыток их перехода из метастабильного состояния в основное. Найденные значения E_{ai} и ν_i подчинялись правилу Меера–Нелдела ($\ln(\nu_i) \propto E_{ai}$) и согласовывались с экспериментальными данными, приведенными в работе [6] для термического отжига метастабильных состояний в пленках α -Si:H. Это указывает на то, что механизмом, ответственным за темновую релаксацию ансамблей МОС и МЭАП в исследованных пленках, является термический отжиг.

Вместе с тем в ряде работ [7, 8] было показано, что в нелегированных пленках α -Si:H скорость изотермической темновой релаксации МОС увеличивается при наличии слабой подсветки, т. е. кроме термического отжига наблюдается фотоиндуцированный отжиг МОС. Однако данные относительно фотоиндуцированного отжига МЭАП в литературе отсутствуют.

В настоящей работе исследовалась релаксация МЭАП в слабо легированных бором пленках α -Si:H в темноте и в условиях слабой подсветки. Пленки были выращены методом осаждения в плазме

ВЧ-разряда при температуре подложки 300 °С. Легирование бором производилось из газовой фазы, и полная концентрация примеси в пленке, измеренная методом вторичной ионной спектроскопии, составляла $(0.8-4) \cdot 10^{17} \text{ см}^{-3}$. Материал имел малую темновую проводимость σ_d , малую концентрацию дефектов и, следовательно, большую фоточувствительность. Вследствие компенсации бором донорных уровней неконтролируемых примесей уровень Ферми в таком материале расположен вблизи середины запрещенной зоны в области достаточно широкого минимума плотности локализованных состояний $\rho(E)$ [9]. Это позволяет предполагать, что в области смещения уровня Ферми в процессе релаксации ФМС плотность локализованных состояний практически постоянна ($\rho(E) = \rho_0$), и, следовательно, можно использовать для определения кинетики релаксации ФМС формулу (1).

На рис. 1 иллюстрируется кинетика изменения ТП пленки, предварительно освещенной белым светом с интенсивностью $W = 90 \text{ мВт} \cdot \text{см}^{-2}$ в течение 600 с, в темноте (кривая 1) и в присутствии слабой подсветки (кривая 2). Кривая 1 описывается суммой двух растянутых экспонент (кривые 3 и 4), которые характеризуют изотермическую релаксацию МОС и МЭАП для ансамблей (I), образованных при предварительном освещении пленки. Значения параметров $N(0)$ (в относительных единицах), τ_0 и β для релаксации МОС (I) и МЭАП (I) указаны в подписи к рис. 1.

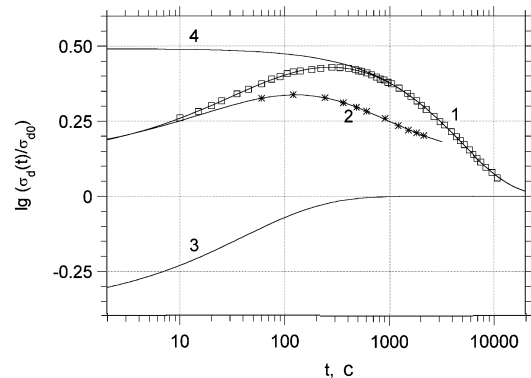


Рис. 1. Кинетика изменения темновой проводимости пленки α -Si:H, слабо легированной бором ($N_B = 3 \cdot 10^{17} \text{ см}^{-3}$), при $T = 410 \text{ К}$ после ее освещения в течение 600 с белым светом с интенсивностью $W = 90 \text{ мВт} \cdot \text{см}^{-2}$. Кривая 1 соответствует релаксации МОС и МЭАП в темноте, кривая 2 — релаксации МОС и МЭАП в условиях слабой подсветки ($W = 8 \text{ мВт} \cdot \text{см}^{-2}$). Кривая 1 отвечает сумме двух растянутых экспонент (кривые 3 и 4) с параметрами $N_1(0) = -0.37$, $\tau_{01} = 39 \text{ с}$, $\beta_1 = 0.54$ и $N_2(0) = 0.49$, $\tau_{02} = 4760 \text{ с}$, $\beta_2 = 0.85$, которые характеризуют соответственно ансамбли МОС (I) и МЭАП (I)

Кинетика изменения ТП при релаксации МОС и МЭАП для ансамблей (I) в условиях слабой подсветки также немонотонна (кривая 2). Однако ее нельзя представлять в виде суммы двух растянутых экспонент, подобных кривым 3 и 4, поскольку термический отжиг МОС и МЭАП в этом случае сопровождается

фотоиндуцированным образованием и, возможно, фотоиндуцированным отжигом МОС и МЭАП. Для выяснения вопроса о возможности фотоиндуцированного отжига МЭАП была исследована кинетика изменения ТП пленки после ее предварительного освещения белым светом с интенсивностью $90 \text{ мВт} \cdot \text{см}^{-2}$ и последующей частичной изотермической релаксации в темноте или при наличии слабой подсветки. Результаты проведенных измерений для пленки, предварительно освещенной в течение 600 с, представлены на рис. 2. Кривая 1 соответствует изменению ТП освещенной пленки после ее частичной изотермической релаксации в темноте в течение 2400 с, кривая 2 — после ее изотермической релаксации в условиях слабой подсветки также в течение 2400 с. Кривая 1 демонстрирует монотонное уменьшение проводимости, что указывает на полный отжиг МОС (I), и описывается одной растянутой экспонентой. Параметры экспоненты указаны в подписи к рис. 2. Это соответствует отжигу только МЭАП для ансамбля II, который образовался в результате термического отжига в темноте ансамбля МЭАП (I) в течение 2400 с.

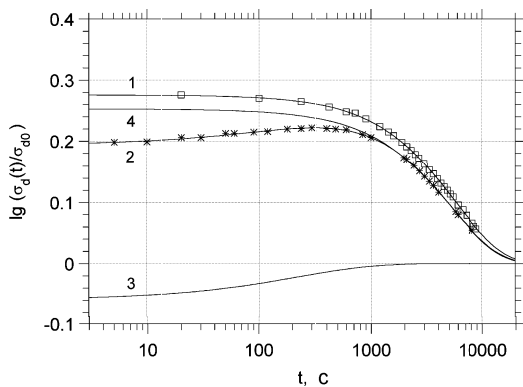


Рис. 2. Кинетика изменения темновой проводимости той же пленки при $T = 410 \text{ К}$ после предварительного освещения белым светом с интенсивностью $90 \text{ мВт} \cdot \text{см}^{-2}$ в течение 600 с и последующей частичной изотермической релаксации в темноте (кривая 1) и при слабой подсветке с интенсивностью $8 \text{ мВт} \cdot \text{см}^{-2}$ (кривая 2). Кривая 1 описывается одной растянутой экспонентой с параметрами $N_2 = 0.277$, $\tau_{02} = 5710 \text{ с}$, $\beta_2 = 0.99$, которые характеризуют ансамбль МЭАП (II). Кривая 2 отвечает сумме двух растянутых экспонент (кривые 3 и 4) с параметрами $N_1 = -0.06$, $\tau_{01} = 220 \text{ с}$, $\beta_1 = 0.64$ и $N_2 = 0.25$, $\tau_{02} = 5220 \text{ с}$, $\beta_2 = 1$, которые характеризуют соответственно ансамбли МОС (III) и МЭАП (III)

Из сравнения значений параметров изотермической релаксации МЭАП для ансамблей (I) и (II) (кривые 1 на рис. 1 и 2) следует, что в результате термического отжига в темноте ансамбля МЭАП (I) в течение 2400 с снизилась концентрация МЭАП (уменьшилась величина $N_2(0)$) и уменьшилась полуширина распределения МЭАП по τ (увеличился параметр β_2). Наблюдается также возрастание эффективного времени релаксации τ_{02} . Это тоже согласуется с представлением о термическом отжиге МЭАП, так как в этом случае в первую очередь отжигаются метастабильные состояния с малыми

временами релаксации τ , что и приводит к увеличению эффективного времени релаксации τ_{02} .

Кривая 2 на рис. 2 немонотонна и описывается суммой двух растянутых экспонент (кривые 3 и 4), которые соответствуют изотермической релаксации МОС и МЭАП для ансамблей (III), полученных в результате термического отжига ансамблей МОС (I) и МЭАП (I) при слабой подсветке. Значения параметров растянутой экспоненты, описывающей изотермическую релаксацию МЭАП для ансамбля (III), приведены в подписи к рис. 2.

Из сравнения значений параметров релаксации ансамблей МЭАП (II) и МЭАП (III) видно, что наличие подсветки при изотермическом отжиге приводит к уменьшению величины $N_2(0)$, т. е. к уменьшению концентрации МЭАП. Это указывает на то, что кроме термического отжига и фотоиндуцированного образования в условиях подсветки имеет место и фотоиндуцированный отжиг МЭАП. Видно также, что уменьшается и эффективное время релаксации τ_{02} для ансамбля МЭАП (III) по сравнению с τ_{02} для ансамбля МЭАП (II). Следовательно, наблюдаемое в результате фотоиндуцированного отжига уменьшение концентрации МЭАП происходит преимущественно за счет уменьшения концентрации МЭАП с большими временами релаксации τ . Это может быть обусловлено различным распределением по τ МЭАП, образованных и отожженных под действием слабой подсветки во время изотермического отжига. Согласно модели, основанной на трехуровневой конфигурационной диаграмме с коррелированными энергиями образования и отжига [2], фотоиндуцированное образование МЭАП представляет собой двухступенчатый процесс: оптическое возбуждение в промежуточное состояние и последующий термический переход в метастабильное состояние. В результате в первую очередь образуются МЭАП с малыми временами τ , что и определяет проявление фотоиндуцированного отжига в преимущественном уменьшении концентрации МЭАП с большими значениями τ .

Таким образом, в настоящей работе установлено, что в исследованных слабо легированных бором пленках $\alpha\text{-Si:H}$ изотермическая релаксация фотоиндуцированных метастабильных электрически активных примесей при слабой подсветке определяется не только их термическим отжигом и фотоиндуцированным образованием, но и фотоиндуцированным отжигом.

Авторы благодарны И.П. Звягину за обсуждение результатов работы.

Работа поддержана программой «Университеты России — фундаментальные исследования» и научной программой ГНЦ «ГИРЕДМЕТ».

Литература

1. Курова И.А., Ларина Э.В., Ормонт Н.Н., Сенашенко Д.В. // ФТП. 1997. 31. С. 1455.

2. Kazanskii A.G., Kurova I.A., Ormont N.N., Zvyagin I.P. // J. Non-Cryst. Sol. 1998. **227–230**. P. 306.
3. Курова И.А., Ормонт Н.Н., Громадин А.Л. // Вестн. Моск. ун-та. Физ. Астрон. 1999. №1. С. 67 (Moscow University Phys. Bull. 1999. No. 1. P. 89).
4. Rath J.K., Fuhs W., Mell H. // J. Non-Cryst. Sol. 1991. **137–138**. P. 279.
5. Redfield D. // Mat. Res. Symp. Proc. 1992. **258**. P. 341.
6. Crandall R.S. // Phys. Rev. 1991. **B43**. P. 4057.
7. Meaudre R., Meaudre M. // Phys. Rev. 1992. **B45**. P. 12134.
8. Gleskova H., Morin P.A., Wagner S. // Appl. Phys. Lett. 1993. **62**. P. 2063.
9. Sheng S., Liao X., Kong G. // Appl. Phys. Lett. 2001. **78**. P. 2509.

Поступила в редакцию
14.12.01

УДК 539.172

УПОРЯДОЧЕНИЕ МАГНИТНЫХ МОМЕНТОВ АТОМОВ В КРИСТАЛЛЕ ПОСЛЕ ДЕЙСТВИЯ ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО ПОЛЯ

А.А. Опаленко, С.К. Годовиков

(кафедра оптики и спектроскопии)

E-mail: pantodon@mail.ru

В редкоземельном магнетике TbFe₂ с примесью олова после воздействия импульсного электрического поля наблюдаются колебания упорядоченной магнитной структуры с периодом примерно 6 дней. Для чистого TbFe₂ (без примеси) ощутимого влияния электрического поля не обнаружено.

Настоящая работа продолжает серию измерений, проводимых с целью изучения поведения редкоземельных магнетиков, возбужденных электрическим полем [1–3]. Ранее [3] в образце TbFe₂ с примесью олова наблюдались колебания параметров мёссбауэровских спектров с периодом 5–6 дней в течение примерно двух недель после возмущения образца электрическим полем и возврат к исходному состоянию через 50 дней. Задача настоящей работы — тщательное исследование этого процесса и сравнение его с поведением чистого TbFe₂ (без примеси).

Эксперимент

Образец представлял собой поликристаллический мёссбауэровский поглотитель в виде порошка, наклеенного на майларовую пленку. Он вместе с изолирующими прокладками из тефлона (для электроизоляции) был помещен между обкладками плоского конденсатора с толщиной зазора 0.4 мм. На конденсатор подавалось напряжение до 20 кВ от высоковольтного выпрямителя УРС-0.02, а затем с помощью переключателя производилось замыкание пластин конденсатора. Малый зазор в конденсаторе, большое напряжение и мгновенный разряд ($\sim 10^{-6}$ с) позволяют довести скорость изменения напряженности электрического поля до величины 10^8 кВ·см⁻¹·с⁻¹.

Мёссбауэровские спектры измерялись при комнатной температуре в течение 40 дней. В исходном состоянии мёссбауэровский спектр чистого соединения TbFe₂ представляет собой суперпозицию двух секстетов линий с величинами сверхтонких магнит-

ных полей 230 и 200 кЭ и отношением интенсивностей (площадей секстетов) $S_1/S_2 = 3$. Соединение с примесью олова (0.5 ат.%) характеризуется несколько меньшими полями, а именно 220 и 190 кЭ соответственно. Результаты измерений представлены на рис. 1 и 2.

Процесс колебаний мёссбауэровского параметра S_1/S_2 в образце TbFe₂(Sn), вызванный разрядом, хорошо виден на рис. 1. В течение 40 дней регистрируется «магнитная волна», имеющая период примерно 6 дней и плавно затухающая во времени. Время затухания колебательного процесса определяется силой электрического воздействия: при слабом «ударе» (меньшем поле) наблюдались только первые три волны, имевшие небольшую амплитуду, но с тем же периодом (6 дней), а при медленном воздействии никаких колебаний не отмечалось.

Аналогичный график для TbFe₂ без примеси представлен на рис. 2. Несколько серий электрических «ударов» такой же силы, как и для TbFe₂(Sn), не привели к каким-либо ощутимым колебаниям параметров мёссбауэровского спектра.

Основным результатом настоящей работы является установление активной роли немагнитной примеси в возникновении наблюдаемого колебательного эффекта. В чем она конкретно выражается?

Во-первых, примесь немагнитного элемента является важнейшей составной частью примесного магнитного центра, впервые обнаруженного в редкоземельных металлах в 1989 г. [4]. Одной из особенностей этого центра является наклон («canting») векторов моментов атомов около атома примеси. В таком