Письма в ЖЭТФ, том 107, вып. 4, с. 276 – 279 © 2018 г. 25 февраля

Влияние слабых магнитных полей на электрические свойства кристаллов CdTe

И. С. Волчков[1)], *В. М. Каневский, М. Д. Павлюк*

Федеральный научно-исследовательский центр "Кристаллография и фотоника" РАН, 119333 Москва, Россия

Поступила в редакцию 27 декабря 2017 г.

Обнаружено влияние постоянного и импульсного магнитных полей (~ 1 Тл) на электропроводность кристаллов CdTe. Эффект наблюдается с задержкой после магнитной экспозиции кристаллов в виде двух пиков их удельной проводимости с последующим релаксационным возвратом. Первый пик при обоих типах магнитной обработки наблюдается через ~ 1 ч после экспозиции, а его амплитуда превышает фоновое значение на ~ 23–36 % (большее значение для постоянного поля). Второй пик в обоих случаях тоже возникает при соизмеримых, но гораздо больших задержках ~ 50–60 ч, а его амплитуды еще сильней различаются для двух типов экспозиции, превышая фон на ~ 60 % для постоянного поля и только на ~ 11 % для импульсного. Обсуждаются возможные механизмы наблюдаемого эффекта.

DOI: 10.7868/S0370274X18040124

Влияние слабого импульсного магнитного поля на свойства и структуру немагнитных материалов [1, 2] было обнаружено еще в 80-х годах XX века. Однако систематические исследования влияния магнитных полей на реальную структуру и пластичность немагнитных кристаллов начались только после открытия магнитопластического эффекта [3]: перемещения дислокаций в кристаллах в процессе их выдержки в постоянном магнитном поле. Эффект был обнаружен в целом ряде независимых групп и активно изучался в щелочно-галоидных кристаллах, немагнитных металлах, полупроводниках и молекулярных кристаллах (см. обзоры [4–8]). Было установлено [6, 8], что при магнитной обработке немагнитных кристаллов имеют место как эффекты in situ, так и постэффекты – длительная или постоянная "память" после экспозиции. Оказалось, что магнитное влияние проявляется не только в подвижности индивидуальных дислокаций, но и в кинетике макродеформации кристаллов при их активном нагружении и ползучести [9–12]. Например, при активной деформации кристаллов LiF и NaCl в магнитном поле их предел текучести снижался в несколько раз [10, 11]. Магнитное воздействие на материалы обычно осуществлялось в постоянном поле ~ 1 Тл, но использовались также высокие импульсные поля до 7 Тл [13] и резонансный режим в схеме ЭПР в скрещенных полях, постоянном и переменном [14, 15]. Недавно было обнаружено [16], что резонансная магнитопластичность в схеме ЭПР наблюдается и в сверхнизких полях, когда постоянное поле – порядка поля Земли (~ 50 мкТл) а переменное поле имеет радио-частоту (~ 10 кГц – 1.4 МГц). Этот эффект оказался сильно анизотропным, а потому весьма информативным.

Поскольку в основе обсуждаемого эффекта лежит магнитоиндуцированное преобразование примесных комплексов, то оно должно проявляться и в других физических свойствах кристаллов. Например, недавно было обнаружено магнитное влияние на диэлектрические свойства сегнетоэлектриков [17–20]. В настоящей работе мы будем интересоваться аналогичными физическими проявлениями магнитного преобразования примесных комплексов в свойствах полупроводников.

Уже наблюдались эффекты влияния слабых магнитных полей на фотопроводимость, интенсивность фотолюминесценции и структуру полупроводников [21–25]. Во многих работах [22–26] измеряемые свойства полупроводниковых кристаллов изменялись под действием магнитных полей в течение продолжительного времени после экспозиции. При этом публикации, посвященные изучению влияния магнитных полей на темновую проводимость полупроводников, нам неизвестны.

Как уже говорилось, в литературе [4–8, 27, 28] изменения в кристаллах под действием магнитного поля принято связывать со спинзависимой трансформацией структуры примесных комплексов, что в свою очередь влияет на структурно-чувствительные физические свойства материалов. Однако разнообразие возможных процессов, запускаемых выдержкой в

1)e-mail: Volch2862@gmail.com

магнитных полях, усложняет понимание конкретных механизмов наблюдаемых эффектов. Интересно также и то, что некоторые работы, посвященные изучению влияния предварительной выдержки в магнитных полях, показывают необратимый характер наблюдаемых изменений [6].

Все это стимулирует дальнейшие исследования магнитоиндуцированных эффектов в немагнитных материалах. Целью настоящей работы было изучение влияния импульсного и постоянного магнитных полей на электрические свойства, в частности, на темновую проводимость полупроводниковых кристаллов CdTe.

В качестве объектов исследования использовались кристаллы CdTe с избытком Cd в 0.02 %, выращенные методом Обреимова–Шубникова [29]. Кристаллы легировались хлором, вводимым в слабой концентрации в виде $CdCl_2$. Полученные кристаллы были n-типа. Поверхности образцов имеют ориентацию (111), перпендикулярную (112) и (110). Рабочие поверхности образованы естественными сколами по плоскостям спайности (110). Использовались образцы прямоугольной формы, размерами $8 \times 4 \times 5$ мм. Для снятия электрических характеристик на рабочие поверхности образцов наносились золотые контакты ($AuCl_3$).

Исследуемые образцы подвергались воздействию импульсного или постоянного магнитных полей: импульсное поле – амплитуда $B = 1$ Тл, $\nu = 12$ Гц, $t_{\text{exp}} = 10$ мин; постоянное магнитное поле – $B = 1$ Тл, $t_{\text{exp}} = 10$ мин. Магнитная импульсная обработка проводилась на установке, позволяющей получать последовательность униполярных импульсов магнитного поля за счет периодического разряда накопительной емкости на индуктор (рис. 1).

Постоянное магнитное поле создавалось электромагнитом. Образец свободно стоял на немагнитной подставке между полюсами электромагнита, диаметр которых во много раз превышал размеры образца. Вектор магнитной индукции был перпендикулярен (110), как в случае обработки постоянным магнитным полем, так и в случае экспозиции в импульсном магнитном поле.

Для исследуемых образцов проводились измерения вольт-амперных характеристик во времени, которые снимались на лабораторной установке, состоящей из универсального источника питания, многофункционального вольтметра и предметного столика, находящегося в изолированной от внешних световых излучений камере. Материал камеры позволял минимизировать влияние внешних электромагнитных помех. По полученным данным строили зависимости удельной электропроводности (σ) от времени после экспозиции (t). Точность измерений σ составляла ± 4.5 %. Электрические измерения проводились до предварительной магнитной обработки и после снятия магнитного поля в течение 200 ч: первые 5 ч с шагом ≈ 0.4 ч, далее с шагом ≈ 15 ч. Во время каждого измерения присутствовал контрольный образец, по составу и размеру идентичный исследуемому, не подвергавшийся воздействию магнитного поля.

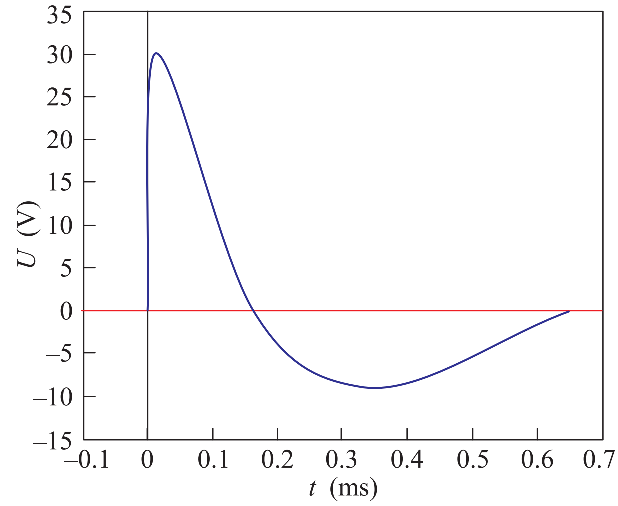

Рис. 1. (Цветной онлайн) Общий вид электрического импульса, подаваемого на соленоид

Полученные в работе экспериментальные данные показывают изменение удельной темновой электропроводности монокристаллов CdTe под действием магнитного воздействия: как импульсного, так и постоянного магнитных полей (рис. 2 и 3). Хо-

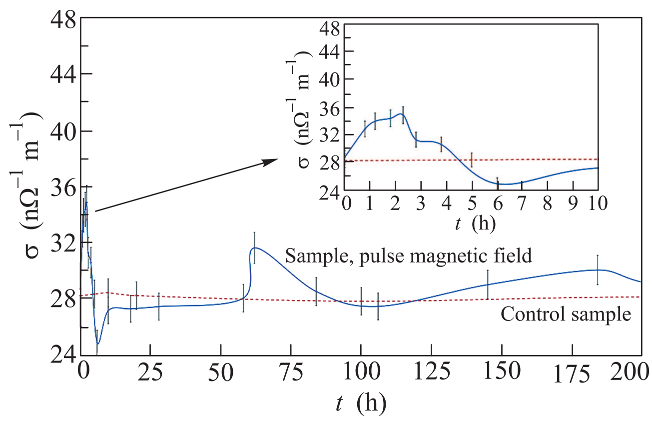

Рис. 2. (Цветной онлайн) Зависимость удельной электропроводности кристаллов CdTe от времени, прошедшего после экспозиции образцов в импульсном магнитном поле

Таблица 1. Максимальные и минимальные значения σ для 1 и 2 пиков изменений свойств

	σ (Ом$^{-1}\cdot$м$^{-1}$), контрольное значение	σ (Ом$^{-1}\cdot$м$^{-1}$), 1 пик 0–7 ч		σ (Ом$^{-1}\cdot$м$^{-1}$), 2 пик 40–120 ч	
		максимум	минимум	максимум	минимум
ПМП	$2.8\cdot10^{-8}$	$3.9\cdot10^{-8}$	$3.45\cdot10^{-8}$	$4.66\cdot10^{-8}$	$2.8\cdot10^{-8}$
ИМП	$2.8\cdot10^{-8}$	$3.48\cdot10^{-8}$	$2.48\cdot10^{-8}$	$3.16\cdot10^{-8}$	$2.8\cdot10^{-8}$

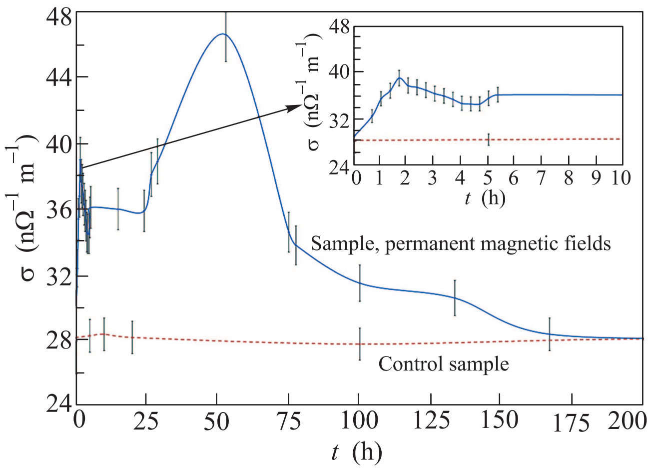

Рис. 3. (Цветной онлайн) Зависимость удельной электропроводности кристаллов CdTe от времени, прошедшего после экспозиции образцов в постоянном магнитном поле

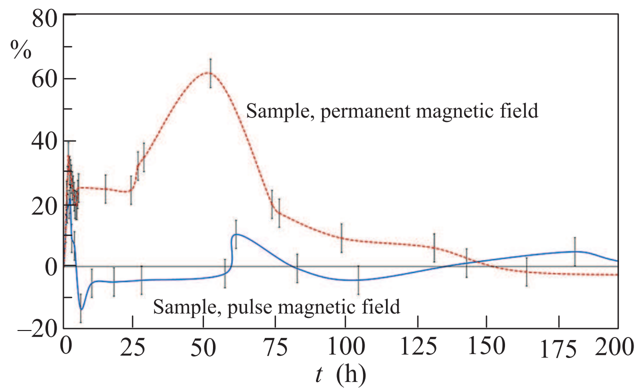

Рис. 4. (Цветной онлайн) Зависимость изменения темновой удельной электропроводности кристаллов CdTe в процентах (%) от времени

тя интенсивность изменения удельной электропроводности для кристаллов CdTe, подвергшихся воздействиям импульсного и постоянного полей, отличаются, но пики изменения свойств имеют схожий вид и коррелируют по своему интервалу на временно́й шкале. Так наблюдаются два пика: во временно́м интервале 0–7 ч, непосредственно после магнитного воздействия, и во временно́м интервале 40–120 ч.

По сравнению с исходным, значение σ увеличивается в первые часы после обработки на 35 % в случае постоянного магнитного поля и на 21 % в случае импульсного магнитного поля. Интересно, что далее удельная электропроводность образца, подвергшегося действию импульсного поля, падает до значений ниже контрольных, а для образца, подвергшегося предварительной обработке в постоянном поле уменьшается на 12 %, оставаясь выше контрольных значений (табл. 1). Второй пик для обоих полей также достигается в схожие времена, после ~ 40 ч. Амплитуда этого пика опять больше для случая постоянного поля – 60 % по сравнению с 11 % для импульсного. Процентное изменение значений σ (рис. 4) рассчитывалось относительно контрольного знания σ.

Магнитное поле может оказывать влияние на измеряемые электрические характеристики за счет снятия запрета на спин-зависимые электронные переходы в дефектных комплексах, что приводит к трансформации их структуры. Дальнейшие изменения свойств, происходящие за часы и даже сутки, могут определяться атомно-диффузионными релаксационными процессами в неравновесной системе преобразованных комплексов. С этих позиций, два наблюдаемых пика, по-видимому, отвечают диффузии разных комплексов с сильно различающимися подвижностями.

Различия в изменениях электрических свойств в исследуемых кристаллах можно объяснить разницей интенсивности воздействия магнитных полей. Принято считать [4, 7], что плотность преобразованных комплексов в магнитном поле B за время экспозиции t_{exp} пропорциональна $B^2 t_{\text{exp}}$. В наших условиях при экспозиции кристаллов в импульсном магнитном поле средняя величина $B^2 t_{\text{exp}}$ значительно ниже, чем в случае постоянного поля. Это и может объяснить существенную разницу интенсивности пиков изменения темновой проводимости. Впрочем, для окончательной интерпретации различий наблюдаемых амплитуд эффектов, отвечающих экспозиции кристаллов в постоянном и переменном поле, потребуются дальнейшие исследования.

Авторы искренне признательны В.И. Альшицу, Е.А. Петржик, М.В. Колдаевой, Е.В. Даринской, А.В. Буташину за многократные стимулирующие обсуждения и конструктивную критику.

1. В. М. Каневский, Г. И. Дистлер, В. В. Москвин, С. Н. Постников, Л. А. Рябинин, В. П. Сидоров, Г. Д. Шнырев, Докл. АН СССР **268**, 591 (1983).
2. В. М. Каневский, Г. И. Дистлер, А. Е. Смирнов, Ю. М. Герасимов, Е. И. Кортукова, А. А. Урусовская, Е. С. Горюнов, Изв. АН СССР, сер. физич. **48**, 2408 (1984).
3. В. И. Альшиц, Е. В. Даринская, А. А. Урусовская, Т. М. Перекалина, ФТТ **29**, 467 (1987).
4. В. И. Альшиц, Е. В. Даринская, М. В. Колдаева, Е. А. Петржик, Кристаллография **48**, 826 (2003).
5. Р. Б. Моргунов, УФН **174**, 131 (2004).
6. Ю. И. Головин, ФТТ **46**, 769 (2004).
7. V. I. Alshits, E. V. Darinskaya, M. V. Koldaeva, and E. A. Petrzhik, in *Dislocations in Solids*, ed. by J. P. Hirth, (Amsterdam: Elsevier) **14**, 333 (2008).
8. А. А. Урусовская, В. И. Альшиц, А. Е. Смирнов, Н. Н. Беккауер, Кристаллография **48**(5), 855 (2003).
9. Ю. И. Головин, Р. Б. Моргунов, Письма в ЖЭТФ **61**, 583 (1995).
10. А. А. Урусовская, В. И. Альшиц, А. Е. Смирнов, Н. Н. Беккауер, Письма в ЖЭТФ **65**, 470 (1997).
11. В. И. Альшиц, Н. Н. Беккауер, А. Е. Смирнов, А. А. Урусовская, ЖЭТФ **115**, 951 (1999).
12. Б. И. Смирнов, Н. Н. Песчанская, В. И. Николаев, ФТТ **43**, 31 (2001).
13. Ю. И. Головин, Р. Б. Моргунов, С. Е. Жуликов, В. А. Киперман, Д. В. Лопатин, ФТТ **39**(4), 634 (1997).
14. Ю. И. Головин, Р. Б. Моргунов, В. Е. Иванов, С. Е. Жуликов, А. А. Дмитриевский, Письма в ЖЭТФ **68**, 400 (1998).
15. Ю. И. Головин, Р. Б. Моргунов, В. Е. Иванов, А. А. Дмитриевский, ЖЭТФ **117**, 1080 (2000).
16. В. И. Альшиц, Е. В. Даринская, М. В. Колдаева, Е. А. Петржик, Письма в ЖЭТФ **104**, 362 (2016).
17. Е. Д. Якушкин, Письма в ЖЭТФ **99**, 483 (2014).
18. Е. С. Иванова, И. Д. Румянцев, Е. А. Петржик, ФТТ **58**, 125 (2016).
19. Р. В. Гайнутдинов, Е. С. Иванова, Е. А. Петржик, А. К. Лашкова, Т. Р. Волк, Письма в ЖЭТФ **106**, 84 (2017).
20. Е. Д. Якушкин, Письма в ЖЭТФ **106**, 523 (2017).
21. Е. Л. Франкевич, Е. И. Балабанов, Письма в ЖЭТФ **1**(6), 33 (1965).
22. В. М. Каневский, В. П. Власов, А. А. Пурцхванидзе, ФТТ **33**(7), 2194 (1991).
23. В. М. Каневский, А. А. Пурцхванидзе, ВОТ научно-техн. Сб. Сер. II, **1–2**, 8 (1993).
24. М. Н. Левин, В. Н. Семенов, Ю. В. Метелева, Письма в ЖТФ **27**(10), 37 (2001).
25. М. Н. Левин, Г. В. Семенова, Т. П. Сушкова, ФТТ **45**(4), 609 (2003).
26. Yu. I. Golovin, R. B. Morgunov, D. V. Lopatin, and A. A. Baskakov, Phys. Status Solidi A **160**, R3 (1997).
27. М. И. Молоцкий, ФТТ **33**(10), 3112 (1991).
28. А. Л. Бучаченко, ЖЭТФ **129**(5), 909 (2006).
29. Yu. M. Ivanov, J. Crystal Growth **194**, 309 (1998).