

05.09

Магнитные и магнитооптические свойства ферромагнитного полупроводника GaN:Cr

© А.Ф. Орлов¹, Л.А. Балагуров¹, И.В. Кулеманов², Н.С. Перов³, Е.А. Ганьшина³,
А.С. Семисалова³, А.Д. Рубачева³, В.И. Зиненко⁴,
Ю.А. Агафонов⁴, В.В. Сарайкин⁵

¹ Государственный научно-исследовательский институт редкометаллической промышленности „ГИРЕДМЕТ“, Москва, Россия

² Московский государственный институт стали и сплавов, Москва, Россия

³ Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова, Москва, Россия

⁴ Институт проблем технологии микроэлектроники и особочистых материалов РАН, Черноголовка, Московская обл., Россия

⁵ Государственный научно-исследовательский институт физических проблем им. Ф.В. Лукина, Москва, Зеленоград, Россия

E-mail: semisalova@magn.ru, materials_science@misis.ru

(Поступила в Редакцию 5 июля 2011 г.)

В диапазоне температур 50–400 К исследованы магнитные и магнитооптические свойства слоев GaN, имплантированных хромом. В полученном материале наблюдалось высокое значение намагниченности насыщения 25 G. Спектры экваториального магнитооптического эффекта Керра выявили сильный магнитооптический отклик в диапазоне энергий менее 3.0 eV, обусловленный новыми спин-поляризованными состояниями в запрещенной зоне GaN при допировании Cr.

Работа выполнена при поддержке РФФИ (гранты № 10-02-00804, 09-02-00309-а). А.С. Семисалова благодарит Министерство образования РФ (грант 14.740.12.0851).

1. Введение

В настоящее время ферромагнитные полупроводники рассматриваются в качестве материалов для инжекторов спин-поляризованных носителей заряда в устройствах полупроводниковой спиновой электроники, а также для разработки нового поколения элементов магнитной памяти [1,2]. Наиболее перспективными классами ферромагнитных полупроводников для этой цели являются широкозонные соединения $A^{III}B^V$ и полупроводниковые оксиды, допированные переходными металлами. Преимущества соединений $A^{III}B^V$ заключаются в их лучшей совместимости со стандартными полупроводниковыми технологиями. В связи с этим большие надежды возлагаются на нитрид галлия GaN, допированный различными элементами, в котором ранее наблюдалась высокая температура Кюри [3–5]. Существование ферромагнитного упорядочения в полупроводниковом GaN, допированном примесями переходных металлов, было предсказано около десяти лет назад [6,7]. До настоящего времени большая часть работ была посвящена исследованию нитрида галлия, допированного Mn. Однако допирование GaN марганцем не обеспечивает значительной намагниченности материала при комнатной температуре; авторы [4], например, наблюдали очень низкое значение остаточной намагниченности для этого соединения, равное 0.3 G.

В то же самое время проведенные расчеты показывают, что наибольшая стабильность ферромагнитного

состояния в системах, основанных на GaN, достигается при допировании хромом [8]. Свойства этого полупроводника до сих пор изучены достаточно слабо. Существование ферромагнетизма при комнатной температуре в нем было продемонстрировано несколькими научными группами [5,9–16], однако сведения о намагниченности этого соединения очень немногочисленны. Кроме того, авторы [17] предсказали возможность 100% поляризации носителей зарядов в допированных хромом AlN/GaN ферромагнитных полупроводниковых гетероструктурах, что делает такие структуры перспективными для использования в спиновой электронике.

В настоящей работе мы представляем результаты исследований магнитных и магнитооптических свойств слоев GaN, имплантированных Cr, в температурном диапазоне 50–400 K.

2. Образцы и методики измерений

В качестве исходного материала использовались слои GaN n -типа со структурой вюрцита, концентрацией носителей 10^{18} cm^{-3} и толщиной $13 \mu\text{m}$ на подложке сапфира (0001). Слои нитрида галлия были подвергнуты имплантации ионами $^{52}\text{Cr}^+$ с энергией 190 keV, доза составила $6 \cdot 10^{16} \text{ cm}^{-2}$. Имплантация проводилась на установке Varian Extrion 200-1000 при температуре подложки 350°C . Высокая температура подложки во вре-

ма процесса имплантации препятствовала аморфизации образца. После имплантации образцы были подвергнуты кратковременному вакуумному отжигу при 800°C в течение 5 минут для частичного удаления радиационных дефектов. Измерения проводились как до, так и после температурной обработки, для исследования магнитных свойств использовался вибрационный магнитометр Lake Shore 7400 с чувствительностью $1 \cdot 10^{-6} \text{ G} \cdot \text{cm}^3$. Исследования экваториального эффекта Керра (ЭЭК) в материале проводились при температурах от 50 до 300 К в диапазоне энергий 0.5–3.5 eV при различных углах падения света.

3. Экспериментальные результаты и обсуждение

Согласно данным масс-спектрометрии вторичных ионов (SIMS) часть имплантированного слоя была расплылена в процессе имплантации вследствие высокого коэффициента расплыления хрома. Эффективная толщина имплантированного слоя составила порядка 50 nm. Также в пределах разрешения SIMS было подтверждено отсутствие кластеров хрома в решетке нитрида.

Проведенные исследования свидетельствуют о наличии ферромагнетизма в имплантированных образцах во всем диапазоне температур вплоть до 400 К. Величина магнитного момента насыщения образцов непосредственно после имплантации составила при комнатной температуре $60 \cdot 10^{-6} \text{ G} \cdot \text{cm}^3$, коэрцитивная сила порядка 120 Oe и поле насыщения около 5 kOe. Петли магнитного гистерезиса для отожженных образцов GaN:Cr при 80 и 300 К показаны на рис. 1. После вакуумного отжига коэрцитивная сила и поле насыщения уменьшились до 100 Oe и 3 kOe соответственно, что является следствием уменьшения количества радиационных дефектов в материале. Величина магнитного момента в результате отжига изменилась незначительно,

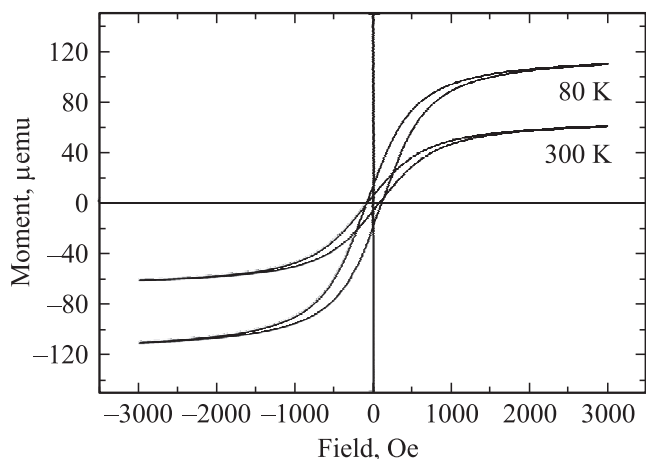


Рис. 1. Петли гистерезиса при 80 и 300 К для отожженной пленки GaN:Cr.

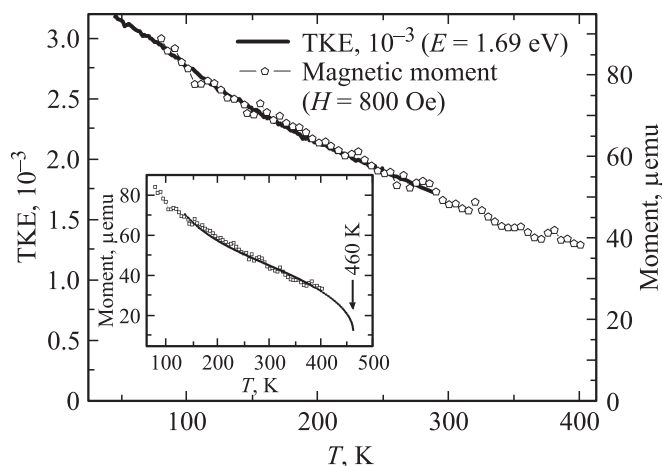


Рис. 2. Температурная зависимость магнитного момента в поле 800 Oe и ЭЭК для GaN, имплантированного Cr. На вставке показана зависимость $M(T)$, полученная в приближении молекулярного поля.

что свидетельствует об отсутствии вклада структурных дефектов в намагниченность. При комнатной температуре намагниченность этого материала достигает значительной величины 25 G. Следует заметить, что такое значение превышает большинство из известных в настоящее время результатов для GaN при допировании другими элементами [3,4,18–21], хотя и не является максимальным [16].

Температурная зависимость магнитного момента представлена на рис. 2. Видно, что температура Кюри материала значительно превышает комнатную. Данные об изменении момента с температурой, полученные методом вибрационной магнитометрии, полностью совпадают с температурной зависимостью ЭЭК. Анализ зависимости проводился в рамках приближения молекулярного поля, которое позволило приблизительно оценить температуру Кюри для данного материала — полученное значение составляет 460 К.

Результаты исследования ЭЭК в GaN:Cr представлены на рис. 2–4. Исследования ЭЭК свежеприготовленного образца при различных углах падения света показывают наличие сильного магнитооптического отклика в запрещенной зоне GaN ($< 3.0 \text{ eV}$). При комнатной температуре максимум эффекта наблюдался для энергии 1.6 eV при угле падения света 64° . Вероятно, это может быть связано с наблюдаемым в [22] акцепторным уровнем замещающих атомов хрома в GaN n -типа, расположенным вблизи $E_v + 2 \text{ eV}$. С уменьшением температуры изменялась лишь интенсивность сигнала пропорционально увеличению магнитного момента образца, форма же спектра оставалась прежней. Магнитооптические исследования также выявляют значительное изменение свойств материала в результате отжига. Изменяется форма спектров, в частности, для области энергий более 2 eV эффект возрастает в несколько раз, а также меняет знак (рис. 4).

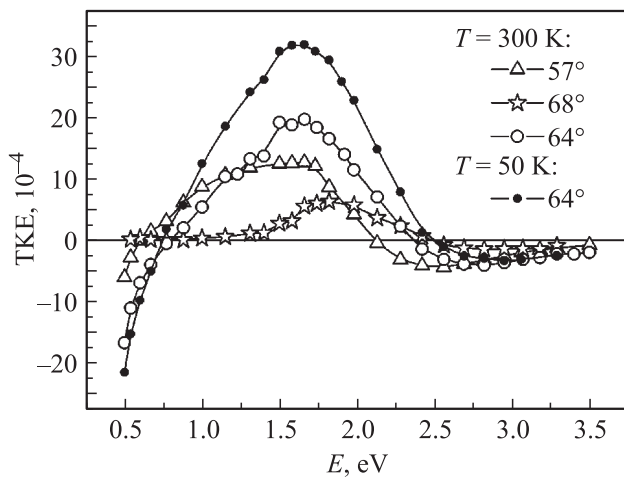


Рис. 3. Спектры ЭЭЖ GaN:Cr при температурах 50 и 300 К и различных углах падения света.

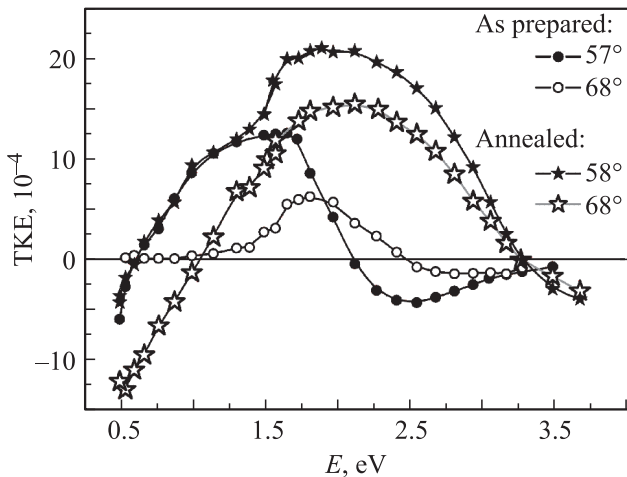


Рис. 4. Спектры ЭЭЖ для GaN:Cr при температуре 300 К и различных углах падения света: до и после термической обработки.

Сильный магнитооптический отклик в диапазоне энергий < 3.0 eV (рис. 3, 4) свидетельствует о наличии новых спин-поляризованных состояний в запрещенной зоне GaN:Cr. Такое поведение соответствует представлению об изменении электронной зонной структуры GaN:Cr, рассчитанной из первых принципов [7] — основное состояние GaN:Cr становится ферромагнитным при замещении атомов галлия хромом, и спин-расщепленные $3d$ -состояния атомов Cr смещаются в запрещенную зону GaN. Более того, ферромагнитное упорядочение в соединении GaN:Cr может возникать не только при замещении хромом галлия в кристаллической решетке GaN, но также при введении кластеров Cr в GaN [17]. Величина магнитного момента таких кластеров может изменяться в широких пределах в зависимости от их типа и структуры [7,17]. Сильное изменение магнитооптических спектров после отжига свидетельствует об

изменениях в спин-поляризованных примесных состояниях. Предположительно, в процессе отжига происходит изменение концентрации дислокаций и перераспределение атомов хрома в решетке нитрида галлия. Это, в свою очередь, влияет на магнитные и магнитооптические свойства. Расчетом из первых принципов авторы [23] показали, что высокотемпературная намагниченность в допированном GaN может быть обеспечена одним РККИ-спиновым взаимодействием.

4. Заключение

В полупроводнике на основе нитрида галлия, имплантированного хромом, наблюдалось высокое значение намагниченности 25 G при комнатной температуре — одно из наибольших среди известных на данный момент значений для этого соединения. Температура Кюри для GaN:Cr может быть оценена как 460 К. Магнитооптические ЭЭЖ спектры в диапазоне энергий менее 2.1 eV выявили сильный отклик, обусловленный возникновением новых спин-поляризованных состояний в запрещенной зоне GaN при ионной имплантации Cr.

Список литературы

- [1] I. Žutić, J. Fabian, S. Das Sarma. *Rev. Mod. Phys.* **76**, 323 (2004).
- [2] M.H. Kryder, C.S. Kim. *IEEE Trans. Magn.* **45**, 3406 (2009).
- [3] S. Sonoda, S. Shimizu, T. Sasaki, Y. Yamamoto, H. Hori. *J. Cryst. Growth*, **237**, 1358 (2002).
- [4] H. Hori, S. Sonoda, T. Sasaki, Y. Yamamoto, S. Shimizu, K.-I. Suga, K. Kindo. *Physica B* **324**, 142 (2002).
- [5] H.X. Liu, S.Y. Wu, R.K. Singh, L. Gu, D.J. Smith, N. Newman, N.R. Dilley, L. Montes, M.B. Simmonds. *Appl. Phys. Lett.* **85**, 4076 (2004).
- [6] T. Dietl, H. Ohno, F. Matsukura, J. Cibert, D. Ferrand. *Science* **287**, 1019 (2000).
- [7] G.P. Das, B.K. Rao, P. Jena. *arXiv:cond-mat/0208258* (2002).
- [8] K. Sato, H. Katayama-Yoshida. *Jpn. J. Appl. Phys.* **40**, L485 (2001).
- [9] S.E. Park, H.-J. Lee, Y.C. Cho, S.-Y. Jeong, C.R. Cho, S. Cho. *Appl. Phys. Lett.* **80**, 4187 (2002).
- [10] H. Asahi, Y.-K. Zhou, M. Hashimoto, M. Kanamura, R. Asano. *J. Korean Phys. Society* **42**, S499 (2003).
- [11] H. Asahi, Y.-K. Zhou, M. Hashimoto, M.S. Kim, X.J. Li, S. Emura, S. Hasegawa. *J. Phys.: Cond. Matter.* **16**, S5555 (2004).
- [12] R.K. Singh, S.Y. Wu, H.X. Liu, L. Gu, D.J. Smith, N. Newman. *Appl. Phys. Lett.* **86**, 012 504 (2005).
- [13] P.R. Davies, B.P. Gila, C.R. Abernathy, S.J. Pearton, S.J. Stanton. *Appl. Phys. Lett.* **96**, 212 502 (2010).
- [14] R. Wang, A.J. Steckl, N. Nepal, J.M. Zavada. *J. Appl. Phys.* **107**, 013 901 (2010).
- [15] L. Yu, Z. Wang, M. Guo, D. Liu, Y. Dai, B. Huang. *Chem. Phys. Lett.* **487**, 251 (2010).
- [16] M. Hashimoto, Y.K. Zhou, M. Kanamura, H. Katayama-Yoshida, H. Asahi. *J. Cryst. Growth* **251**, 327 (2003).

- [17] J.E. Medvedeva, A.J. Freeman, X.Y. Cui, C. Stampfl, N. Newman. *Phys. Rev. Lett.* **94**, 146 602 (2005).
- [18] G.T. Thaler, M.E. Overberg, B. Gila, R. Frazier, C.R. Abernathy, S.J. Pearton, J.S. Lee, S.Y. Lee, Y.D. Park, Z.G. Khim, J. Kim, F. Ren. *Appl. Phys. Lett.* **80**, 3964 (2002).
- [19] S. Sonoda, I. Tanaka, H. Ikeno, T. Yamamoto, F. Oba, T. Araki, Y. Yamamoto, K. Suga, Y. Nanishi, Y. Akasaka, K. Kindo, H. Hori. *arXiv:cond-mat/0511435* (2005).
- [20] J.-H. Lee, I.-H. Choi, S. Shin, S. Lee, J. Lee, C. Whang, S.-C. Lee, K.-R. Lee, J.-H. Baek, K.H. Chae, J. Song. *Appl. Phys. Lett.* **90**, 032 504 (2007).
- [21] R.-T. Huang, C.-F. Hsu, J.-J. Kai, F.-R. Chen, T.-S. Chin. *Appl. Phys. Lett.* **87**, 202 507 (2005).
- [22] A.Y. Polyakov, N.B. Smirnov, A.V. Govorkov, N.V. Pashkova, A.A. Shlensky, S.J. Pearton, M.E. Overberg, C.R. Abernathy, J.M. Zavada, R.G. Wilson. *J. Appl. Phys.* **93**, 5388 (2003).
- [23] L.-F. Zhu, B.-G. Liu. *J. Phys. Cond. Matter.* **21**, 446 005 (2009).