

Наблюдение плазменного и магнитоплазменного резонансов двумерных электронов в одиночном гетеропереходе MgZnO/ZnO

В. Е. Козлов^a, А. Б. Ваньков^a, С. И. Губарев^a, И. В. Кукушкин^{a,f}, Дж. Фалсон^{b1)}, Д. Мариенко^{c1)},
Й. Козука^{b1)}, А. Тсуказак^{di1)}, М. Кавасаки^{bc1)}, Дж. Х. Смет^{f1)}

^aИнститут физики твердого тела РАН, 142432 Черноголовка, Россия

^bDepartment of Applied Physics and Quantum-Phase Electronics Center (QPEC), University of Tokyo, 113-8656 Tokyo, Japan

^cRIKEN Center for Emergent Matter Science (CEMS), 351-0198 Wako, Japan

^dInstitute for Materials Research, Tohoku University, 980-8577 Sendai, Japan

ⁱPRESTO, Japan Science and Technology Agency (JST), 102-0075 Tokyo, Japan

^fMax-Planck-Institut für Festkörperforschung, D-70569 Stuttgart, Germany

Поступила в редакцию 16 июля 2013 г.

Исследована магнитолюминесценция двумерной электронной системы в одиночном гетеропереходе Mg_xZn_{1-x}O/ZnO ($x = 0.02$) при температуре 0.3 К в полях до 14 Т. Из осцилляций интенсивности люминесценции в зависимости от магнитного поля определена концентрация двумерных электронов в исследуемой структуре. Она оказалась близкой к величине, измеренной в транспорте. С использованием методики оптического детектирования микроволнового поглощения обнаружен резонанс, отвечающий плазменным возбуждениям двумерных электронов. В магнитном поле обнаружена и исследована нижняя ветвь магнитоплазменных возбуждений, отвечающая распространению краевого магнитоплазмона в структуре с геометрией, близкой к квадрату.

DOI: 10.7868/S0370274X1316008X

В последнее время большое внимание привлекли низкоразмерные структуры на основе широкозонных полупроводников типа A^{III}B^{VI}. Этот интерес во многом обусловлен возможностью использования таких структур в качестве лазерных источников ультрафиолетового (УФ) диапазона. В частности, недавно в работах [1, 2] показана возможность лазерной генерации на тонких пленках ZnO при комнатной температуре.

Это послужило толчком к развитию технологии роста низкоразмерных систем на основе оксида цинка. За последние несколько лет удалось получить гетероструктуры Mg_xZn_{1-x}O/ZnO очень высокого качества. Это подтверждается высокой подвижностью двумерных электронов вплоть до $8 \cdot 10^5$ см²/Вс [3, 4] и наблюдением в таких структурах целочисленного и дробного квантового эффекта Холла [5, 6].

Особый интерес к низкоразмерным системам на основе ZnO обусловлен значительно более сильным кулоновским взаимодействием двумерных электронов в таких системах по сравнению с низкоразмерными

структурами на основе A^{III}B^V полупроводниковых соединений. Важность кулоновских корреляций в двумерных системах обычно характеризуется безразмерным параметром r_s , представляющим собой отношение энергии кулоновского взаимодействия E_c к энергии Ферми E_F :

$$r_s = \frac{E_c}{E_F} = \frac{m^* e^2}{\varepsilon \hbar^2 \sqrt{\pi n}}, \quad (1)$$

где m^* – эффективная масса носителей заряда, e – заряд электрона, ε – диэлектрическая проницаемость, n – концентрация носителей заряда.

Большая величина эффективной массы электронов ZnO ($m^* \approx 0.29m_0$ [7]) и относительно малое значение диэлектрической проницаемости ($\varepsilon = 8.5$) приводят к тому, что величина постоянной Ридберга, описывающей кулоновское взаимодействие в электронной системе, в структурах на основе ZnO оказывается почти на порядок выше, чем в GaAs (62 и 5.5 мэВ соответственно). Такое сильное электрон-электронное взаимодействие, по-видимому, и проявилось в транспортных измерениях двумерных электронов с малой электронной плотностью в Mg_xZn_{1-x}O/ZnO. В нем наблюдалось линей-

¹⁾J. Falson, D. Maryenko, Y. Kozuka, A. Tsukazaki, M. Kawasaki, J. H. Smet

ное увеличение эффективной массы композитных фермионов в зависимости от магнитного поля [4, 8].

Целью настоящей работы является исследование магнитолюминесценции и возможности использования методов оптического детектирования для изучения микроволновых резонансов [9] в двумерных системах на основе гетероперехода MgZnO/ZnO.

Измерения проводились на структурах $Mg_xZn_{1-x}O/ZnO$ ($x = 0.02$), представляющих собой одиночный гетеропереход. Структура была выполнена в виде прямоугольника размером $1 \times 1.1 \text{ мм}^2$. Концентрация электронов в исследуемой структуре определялась из зависимости интенсивности спектров фотолюминесценции от магнитного поля, а также из транспортных измерений. Измерения проводились в криостате с откачкой паров ^3He в диапазоне температур 0.3–4.2 К и магнитных полях до 14 Т. Оптический доступ к образцу в криостате был реализован с применением одиночного кварцевого световода, по которому осуществлялись как фотовозбуждение образца, так и сбор сигнала фотолюминесценции. Для фотовозбуждения образца использовалось излучение HeCd лазера с длиной волны 325 нм и оптической мощностью $\sim 20 \text{ мкВт}$. Собранный сигнал фотолюминесценции поступал через световодный Y-разветвитель на вход спектрометра Monospec с дисперсией 4 Å/мм и спектральным разрешением 0.3 Å. Фоторегистрация осуществлялась с помощью CCD-матрицы, охлаждаемой азотом.

Плазменные и магнитоплазменные возбуждения двумерной электронной системы исследовались нами методом оптического детектирования микроволновых резонансов. Для этого к образцу в криостате наряду с оптическим возбуждением по коаксиальному волноводу подводилось СВЧ-излучение. Образец помещался в SMA-разъем таким образом, что он находился между коаксиальной жилой и экраном разъема (см. рис. 1). При этом SMA-разъем служил согласующей нагрузкой, поглощающей микроволновое излучение. Это помогало избежать паразитных переотражений СВЧ-волны и позволяло получить почти плоскую характеристику микроволнового возбуждения вплоть до частот 27 ГГц. Генератор Anritzu обеспечивал высокочастотное микроволновое излучение мощностью 1 мВт в диапазоне от 0 до 67 ГГц. Данная методика предоставляла возможность как разворачивать частоту при фиксированном значении магнитного поля, так и разворачивать магнитное поле при фиксированной частоте СВЧ-излучения.

На рис. 2а приведен типичный спектр фотолюминесценции в спектральной области, характерной

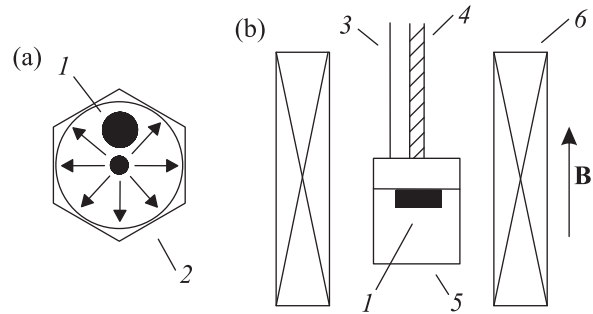


Рис. 1. (а) – Образец 1 помещался в SMA-разъем 2 между коаксиальной жилой и внешним экраном образца. (б) – Оптическое возбуждение и регистрация люминесценции от образца осуществлялись с помощью световода 3. Микроволновое излучение от генератора передавалось по коаксиальному кабелю. SMA-разъем вместе с образцом 5 помещался в центр сверхпроводящего магнита 6

для рекомбинации свободных и связанных экситонных комплексов в гетероструктуре $Mg_xZn_{1-x}O/ZnO$ ($x = 0.02$). Линия 2D со спектральным положением в районе 3.368 эВ обнаруживает магнитопольную зависимость с выраженными скачками спектрального положения и осцилляциями интенсивности люминесценции при определенных значениях магнитного поля.

На рис. 2б показана зависимость интенсивности сигнала фотолюминесценции с энергией 3.367 эВ от нормальной компоненты магнитного поля в диапазоне от 0 до 8 Т. На графике видна серия осцилляций интенсивности с характерными минимумами по магнитному полю, отмеченными стрелками. Эксперименты, проведенные в наклонном поле, показали, что положение наблюдаемых осцилляций интенсивности фотолюминесценции зависит только от нормальной компоненты магнитного поля. Данные значения магнитных полей хорошо описываются зависимостью $B_{\perp} \sim 1/\nu$ для целочисленных факторов заполнения в диапазоне ν от 7 до 2. Линейная зависимость скачков интенсивности фотолюминесценции от обратного фактора заполнения $1/\nu$ и поведение в наклонном поле (чувствительность только к нормальной компоненте магнитного поля) явно указывают на двумерный характер электронов, участвующих в процессе рекомбинации. Согласно [10] это позволяет связать наблюдаемые осцилляции с целочисленными факторами заполнения уровней Ландау исследуемой двумерной системы. Отсюда можно определить концентрацию двумерных электронов, которая в исследуемой нами системе составила $n_{2D} = (3.68 \pm 0.02) \cdot 10^{11} \text{ см}^{-2}$. Эта величина хорошо

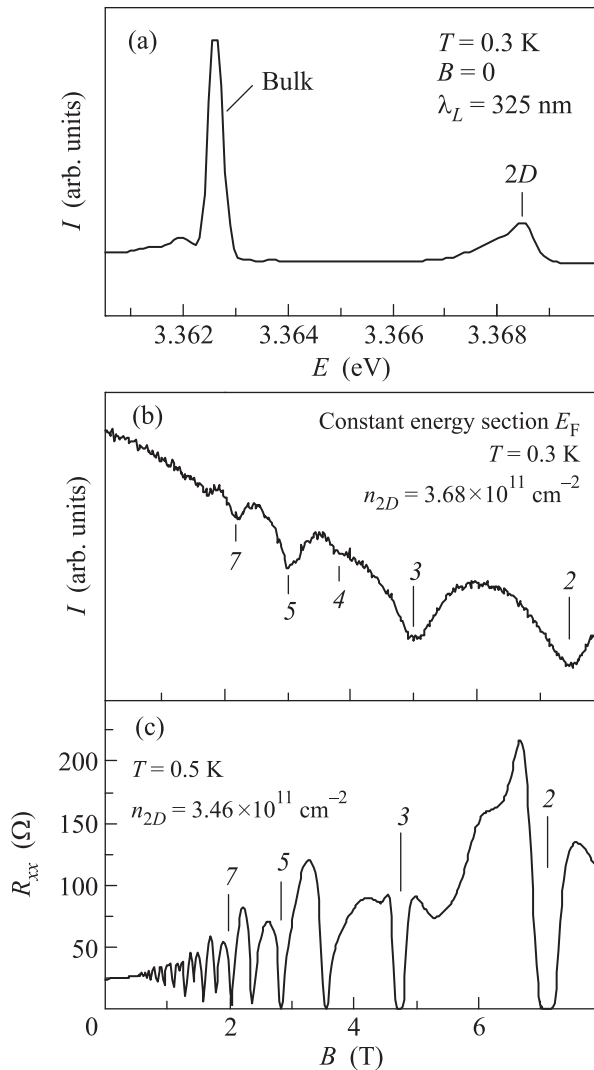


Рис. 2. (а) – Спектр фотолуминесценции гетероструктуры $\text{Mg}_{0.02}\text{Zn}_{0.98}\text{O}/\text{ZnO}$ при фотовозбуждении лазером $\lambda_L = 325$ нм и температуре 0.3 К в магнитном поле $B = 0$. (б) – Магнитополевая зависимость интенсивности сигнала ФЛ при энергии 3.368 эВ. Цифрами обозначены целочисленные факторы заполнения уровней Ландау. (с) – Осцилляции Шубникова-де Гааза, измеренные в отсутствие фотовозбуждения. Цифры – факторы заполнения двумерной электронной системы

согласуется с концентрацией, полученной с помощью транспортных измерений (см. рис. 2с).

На рис. 3а представлены спектры излучательной рекомбинации двумерных электронов, измеренные в условиях облучения микроволновым излучением (пунктир) и без него (сплошная линия). В нижней части рис. 3а приведен дифференциальный спектр, представляющий собой разницу между двумя этими спектрами. Видно, что исследуемая линия рекомбинационного излучения действительно чувствитель-

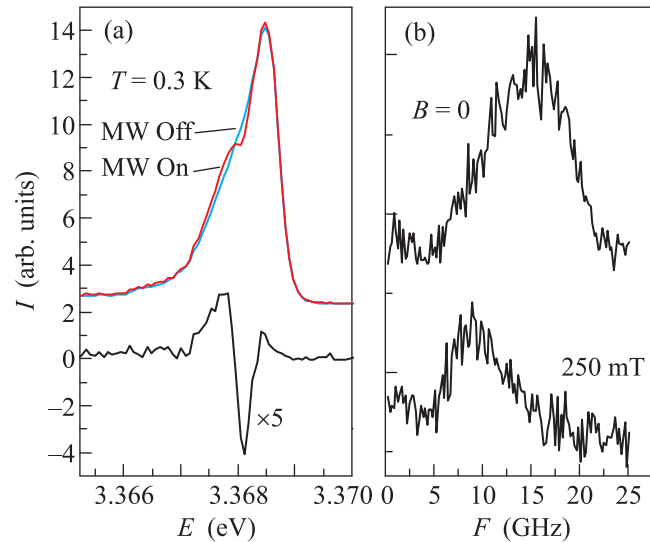


Рис. 3. (а) – Спектр люминесценции и дифференциальный по мощности СВЧ-спектр излучения, измеренные в двумерной электронной структуре с геометрией прямоугольника размером 1×1.1 мм² в магнитном поле $B = 0$ при микроволновом возбуждении с частотой $F = 14.5$ ГГц. Концентрация двумерных носителей $n_{2D} = 3.68 \cdot 10^{11}$ см⁻². (б) – Характерные резонансы микроволнового поглощения для различных магнитных полей при развороте частоты микроволнового возбуждения

на к микроволновому возбуждению. Такое поведение связано с резонансным поглощением СВЧ-системой двумерных электронов. Оно приводит к росту температуры и проявляется в изменении формы линии и интенсивности рекомбинационного излучения, обусловленного двумерными электронами. Абсолютное значение дифференциального сигнала интегрировалось по всему диапазону длин волн. Исследовалась зависимость этого интеграла от частоты микроволнового излучения. На рис. 3б показаны две резонансные кривые, полученные с помощью данной методики при двух значениях магнитного поля. В нулевом магнитном поле в исследуемой области частот наблюдается пик с частотой 15 ± 0.5 ГГц, который связан с резонансным поглощением СВЧ электронной системой. Из-за небольшой разницы между продольным и поперечным размерами образца частоты плазменных колебаний вдоль и поперек него практически совпадают. Поэтому, как и в случае плазменных колебаний в диске, для плазменной частоты ω_p в отсутствие эффектов запаздывания можно воспользоваться формулой [11, 12]

$$\omega_p^2 = \frac{2\pi n_s e^2}{m^* \epsilon} q. \quad (2)$$

Для нашего образца, в котором $q = \pi/a$ ($a \sim 1$ мм), плазменная частота с учетом концентрации, определенной с помощью магнитопольевой зависимости (см. рис. 2b) и эффективной массы $m_c = 0.3m_0$ [13], составляет 14.5 ГГц. Это практически совпадает с полученным нами экспериментальным значением. Это позволяет интерпретировать наблюдаемый нами резонансный пик как плазменное возбуждение в двумерной электронной системе. Отметим, что ширина плазменного резонанса составляет 10 ГГц, что отвечает электронной подвижности $\mu = 17 \cdot 10^4$ см²/Вс. В магнитном поле, перпендикулярном поверхности образца, линия резонансного микроволнового поглощения смещается в сторону меньших частот (нижняя кривая на рис. 3b). В поле $B = 250$ мТ частота резонанса составляет 8.7 ГГц.

На рис. 4 показана магнитопольевая зависимость наблюдаемых резонансов. Видно, что частота резо-

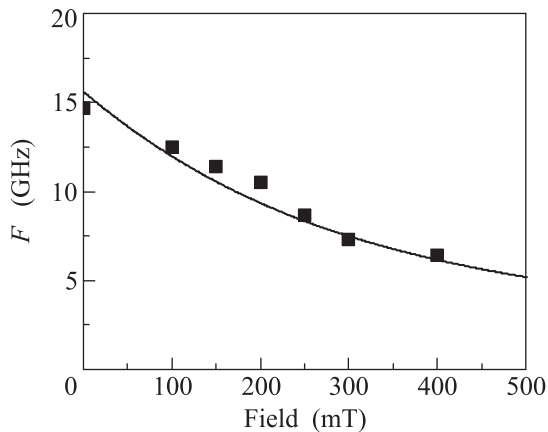


Рис. 4. Зависимость резонансной частоты магнитоплазменного возбуждения от магнитного поля, измеренная в гетеропереходе MgZnO/ZnO. Сплошной линией показана аппроксимация для краевой моды [14]

нанса уменьшается с ростом магнитного поля. Такое поведение характерно для краевого магнитоплазмона. Последнее указывает на существование в двумерных электронных системах на основе MgZnO/ZnO, помимо чисто плазменных, также и магнитоплазменных возбуждений. Полученные нами экспериментальные данные хорошо аппроксимируются теоретическими расчетами для краевой моды в двумерном диске из работы [14].

Итак, в настоящей работе была изучена магнитолюминесценция двумерных электронных систем в одиночном гетеропереходе Mg_xZn_{1-x}O/ZnO ($x = 0.02$) при температуре 0.3 К в полях до 14 Т. Из зависимости осциллирующей интенсивности люминесценции от магнитного поля была определена концентрация двумерных электронов. В исследуемом образце она составила $n_{2D} = (3.68 \pm 0.02) \cdot 10^{11}$ см⁻², что оказалось близко к величине, измеренной в транспорте. С помощью методики оптического детектирования для плазменных и магнитоплазменных резонансов обнаружена линия резонансного микроволнового поглощения, отвечающая плазменному возбуждению в системе двумерных электронов. В магнитном поле, нормальном к поверхности образца, обнаружена и исследована нижняя ветвь магнитоплазмонов, которая отвечает распространению краевого возбуждения в структуре с геометрией, близкой к квадрату.

1. P. Zu, Z. K. Tang, G. K. L. Wong et al., Solid State Commun. **103**, 459 (1997).
2. D. M. Bagnall, Y. F. Chen, Z. Zhu et al., Appl. Phys. Lett. **70**, 2230 (1997).
3. J. Falson, D. Maryenko, Y. Kozuka et al., Appl. Phys. Express **4**, 091101 (2011).
4. D. Maryenko, J. Falson, Y. Kozuka et al., Phys. Rev. Lett. **108**, 186803 (2012).
5. A. Tsukazaki, A. Ohtomo, T. Kita et al., Science **315**, 1388 (2007).
6. A. Tsukazaki, S. Akasaka, K. Nakahara et al., Nat. Mater. **9**, 889 (2010).
7. W. S. Baer, Phys. Rev. **154**, 785 (1967).
8. A. Tsukazaki et al., Phys. Rev. B **78**, 233308 (2008).
9. I. V. Kukushkin, J. H. Smet, S. A. Mikhailov et al., Phys. Rev. Lett. **90**, 156801 (2003).
10. I. V. Kukushkin and V. B. Timofeev, Adv. Physics **45**, 147 (1996).
11. S. J. Allen, H. L. Stormer, and J. C. M. Hwang, Phys. Rev. B **28**, 4875 (1983).
12. I. V. Kukushkin, J. H. Smet, V. A. Kovalskii et al., Phys. Rev. B. **72**, 161317 (2005).
13. Y. Kasahara, Y. Oshima, J. Falson et al., Phys. Rev. Lett. **109**, 246401 (2012).
14. S. J. Allen, H. L. Stormer, and J. C. M. Hwang, Phys. Rev. B. **28**, 4875 (1983).