1. Здравствуйте, меня зовут Григорий Димитриев, тема моей диссертации «Спин-зависимые явления в разбавленном магнитном полупроводнике (Ga,Mn)As». Мой научный руководитель Фиктор Федорович Сапега.
2. **Цель моей работы заключалась** в исследовании спин-зависимых явлений в объемном РМП (Ga,Mn)As и структурах с квантовыми ямами на его основе и определении параметров материала, важных для теоретического моделирования ферромагнетизма.
3. Моя диссертация состоит из введения, шести глав и заключения. Первая глава содержит обзор литературы, вторая глава описание установки, автоматизации и список всех образцов, исследованных в работе. Главы с третьей по шестую содержат результаты исследований. //Те главы, о которых не буду рассказывать, -- описать. В рамках данного семинара я расскажу главы, … Я буду рассказывать результаты, описанные в третьей и шестой главе. (Ю.Г. Кусраев -> 10 минут!?... из введений и заключений составить, полагаю) В **третьей** главе приведено исследование методом резонансного НРСПС энергетической структуры нейтрального акцептора Mn (𝐴0𝑀𝑛) в объемной легированном GaAs:Mn в зависимости от внешней одноосной деформации и магнитного поля, с учетом наличия внутренних случайных полей. На основе сравнения с теоретическими расчетами в спектрах НРСПС идентифицированы линии, соответствующие переходам между мультиплетами основного и первого возбужденного состояний акцептора 𝐴0𝑀𝑛, определены соответствующие эффективные g-факторы, а также (оценена - у Игоря?) величина деформационного потенциала константы p-d обменного взаимодействия между ионом𝑀𝑛2+ и дыркой валентной зоны. В **четвертой** главе методом поляризованной фотолюминесценции горячих электронов исследовано влияние внешней одноосной деформации на магнитную анизотропию эпитаксиальных слоев ФМ РМП (Ga,Mn)As. Изучено комбинированное воздействие внешней одноосной деформации и магнитного поля на спиновую поляризацию дырок, связанных на акцепторах Mn. Для сравнения методом поляризованной краевой фотолюминеценции исследовано влияние внешней деформации на поляризацию дырок, связанных на акцепторах, в легированном GaAs:Mn. Определены постоянные магнитной анизотропии и магнитострикции для (Ga,Mn)As. В **пятой** главе методом поляризованной фотолюминесценции горячих электронов исследована спиновая поляризация дырок во внешнем магнитном поле в структурах с ферромагнитными квантовыми ямами (Ga,Mn)As/AlAs, а также, для сравнения, в объемном РМП (Ga,Mn)As, объемном легированном GaAs:Mn и легированных СКЯ GaAs:Mn/AlAs. Из полученных данных и сравнения с теоретическим расчетом сделан вывод, что ферромагнетизм в СКЯ РМП (Ga,Mn)As/AlAs в значительной степени обусловлен дырками, локализованными в примесной зоне акцептора Mn, а не свободными дырками валентной зоны. Второй вывод заключается в том, что спиновая поляризация дырок примесного уровня в двумерном РМП определяется преимущественно внутренними случайными полями, а не влиянием размерного квантования. В **шестой** главе методом НРСПС исследована поперечная релаксация спина иона 𝑀𝑛2+ и перенормировка эффективного g-фактора иона 𝑀𝑛2+ в ФМ РМП (Ga,Mn)As: из ширины линии НРСПС получена зависимость времени поперечной релаксации спина иона𝑀𝑛2+ от температуры и магнитного поля, а из зависимости величины энергетического сдвига линии НРСПС от магнитного поля получена температурная зависимость эффективного g-фактора иона𝑀𝑛2+.
4. Наблюдалось уменьшение g-фактора на ∼ 5% при переходе из парамагнитной в ферромагнитную фазу.
5. Здесь приведен перечень опубликованных статей, в которых содержатся результаты проведенных исследований.
6. Здесь приведена апробация работы, конференции, на которых докладывались результаты.
7. Разбавленные Магнитные Полупроводники - твердые полупроводниковые растворы, в основной немагнитной кристаллической решетке которых часть атомов замещена магнитными атомами. Типичная концентрация магнитной примеси в этом случае составляет несколько %. В качестве немагнитного полупроводника, «основы», могут выступать (III,V), (II,VI), (IV) соединения. Интерес к (III-V) РМП обусловлен, прежде всего, их хорошей совместимостью с полупроводниковой электроникой на базе (III-V) полупроводников. Первоначально, с конца 70-х годов исследования в данной области были сосредоточены на A2B6 соединениях, ферромагнетизм посредством косвенного обмена в РМП был впервые обнаружен в соединении PbSnMnTe в 1986 году. Созданию ФМ РМП на базе A3B5 соединения, легированного Mn, первоначально препятствовала сегрегация Mn, формирование кластеров MnAs. Ситуация изменилась после работ Ohno и Munekata 1989-1992 годов, когда методом НТ МПЭ удалось синтезировать ферромагнитный разбавленный полупроводник (In,Mn)As. В 1996 году Ohno и др. удалось синтезировать ФМ (Ga,Mn)As. Одни из последних значений температуры Кюри для (Ga,Mn)As составляет >185K в объемном полупроводнике и >200K в нанотрубках. В этой работе были исследованы различные спин-зависимые явления в (Ga,Mn)As.
8. GaAs обладает структурой цинковой обманки. Это прямозонный полупроводник. Ширина запрещенной зоны составляет 1.42 эВ при 300К и 1.52 эВ при 4К. При легировании кристалла GaAs примесью Mn атом Mn встраивается в решетку, замещая Ga. При низких уровнях легирования возникает парамагнитный легированный кристалл с энергией акцепторного уровня выше потолка валентной зоны на 113 мэВ. При высоких концентрациях легирования в несколько % и выращивании методом низкотемпературной молекулярно-пучковой эпитаксии формируется твердый раствор, РМП, Mn формирует примесную зону. Электронная конфигурация Mn 3d5 4s2, т.е. у Mn 2 валентных электрона, в то время как в узле Ga необходимо 3 электрона для заполнения связей с ближайшими атомами As. Mn в данном случае выступает не только как магнитная примесь, но и как акцептор, которому для заполнения недостающей связи не хватает одного электрона. В этом случае возникает вопрос о связи между Mn и дыркой. Возможны два варианта, слабой связи, случай делокализованной дырки, и сильной связи, случай, когда дырка входит в 3d5 оболочку.
9. Многочисленные эксперименты показали, что справедлива модель слабой связи. **В том числе**, это наблюдалось в экспериментах по ЭПР, где было показано, что линии с g-факторами, которые ожидались бы в модели слабой связи, не наблюдались. Напротив, в спектрах детектировались линии с g-факторами, кратными 2.77, что согласовывалось с моделью слабой связи. Также в экспериментах по поляризованной горячей фотолюминесценции наблюдался отрицательный знак поляризации по сравнению с парамагнитной примесью Zn, что объяснялось антиферромагнитным взаимодействием между ионом Mn и дыркой при низких температурах. Также в экспериментах по НРСПС наблюдались линии с g-факторами, которые описывались в рамках модели слабой связи.
10. Модель слабой связи была подробно рассмотрена в работе Аверикева и других в 1988 году, там было показано, что наличие отрицательного p-d обменного взаимодействия приводит в отсутствии внутренних случайных и внешних полей к расщеплению 24-кратно вырожденного уровня на 4 со значениями полного углового момента F от 1 до 4. Также, **помимо прочего**, в этой работе было рассмотрено расщепление уровней при наличии внешней одноосной деформации, а также рассчитаны g-факторы основного F=1 и возбужденных уровней.
11. Третья глава посвящена исследованию тонкой структуры нейтрального акцептора Mn при наличии внешней деформации и магнитного поля в объемном парамагнитном GaAs, легированном Mn. Для были выполнены измерения на образце, выращенном методом Чохральского в направлении [111] с концентрацией Mn 6x10^17 см-3 (10^17 см-3 == 5\*10^-6). Эксперимент проводился методом НРСПС (не раскрывать. в отсутствии магнитного поля – методом НРС - смотрелась поляризация вдоль P – pi, и перпендикулярно – sigma.). В отсутствии магнитного поля использовалась геометрия обратного рассеяния и pi-поляризацией вдоль приложенной деформации, а sigma – перпендикулярно.
12. Были получены спектры краевой фотолюминесценции при Т=4К и внешней одноосной деформации вдоль оси [111]. Возбуждение велось HeNe лазером на энергии 1.96 эВ. Наблюдали полосу ФЛ, соответствующие экситону и экситону, связанному на акцепторе (почему именно так решили??? Что это оно?), которая смещалась в область высоких энергий при приложении внешней деформации. Затем эта полоса резонансно возбуждалась Ti-Sa лазером на энергии ~1.514 эВ, и детектировались спектры НРС и НРСПС. В спектрах НРС наблюдались линии, связанные с переходами между уровнями нейтрального акцептора Mn. Приложение внешней одноосной деформации приводило к расщеплению этих уровней. Величина приложенной деформации составляла до до 4.8 кбар.
13. При максимальной деформации дополнительно прикладывалось внешнее магнитное поле, которое снимало двукратное вырождение мультиплетов с ненулевой проекцией углового момента. Соответственно, прикладывалось внешнее магнитное поле, чтобы определить происхождение линий НРСПС. Стоит отметить, что в спектре наблюдались линии 7 и 8 с g-фактором gd=2.02+-0.02. Поскольку это значение хорошо согласуется с значениями, полученными в работах методами ЭПР (1987, Schneider) и НРСПС (2001, Sapega) для отрицательно заряженного иона Mn2+, был сделан вывод, что эти линии соответствуют парамагнитному резонансу примеси Mn2+ и переходам внутри 3d5-оболочки отрицательного заряженного иона Mn2+. Остальные линии, относящиеся к нейтральному акцептору Mn2+, были идентифицированы в рамках теоретической модели, построенной Игорем Крайновым и Н.С. Аверкиевым. Данная теоретическая модель является расширением модели, описанной в работе 1988 г. Н.С. Аверкиевым, на случай одновременного приложения внешней одноосной деформации, магнитного поля и наличия внутренних случайных полей. (ВОПРОС: там наблюдается линия, относящаяся к отрицательно заряженному иону Mn2+, хоть и в легированном образце. В главе про дефазировку для этого нужно было отклонять на 10-15 градусов. А тут? Т.к. резонансно?)
14. На этом слайде приведены основные величины (численные значения, значения параметров), полученные в данной работе. g-фактор основного уровня с F=1 в рамках погрешности совпадает с величинами, полученными в других работах методами ЭПР и НРСПС. g-фактор для первого возбужденного уровня с F=2 получен в рамках аппроксимации и составляет 1.92, это получено впервые. Значение для величины случайных полей также соответствует более ранним работам. Уточнено значение константы p-d обменного взаимодействия, при приложении внешней одноосной деформации наблюдалось её линейное уменьшение с деформационным потенциалом 0.2 эВ. Ниже представлены значения константы p-d обменного взаимодействия, полученные в других работах методами …. (разобраться, что там за статьи и что за методы, сокращения не понятны.)
15. В данной главе получены следующие основные результаты: <…>
16. В шестой главе изучены механизмы спиновой релаксации ионов Mn2+ в ферромагнитном (Ga,Mn)As. Для этого были выполнены измерения на двух группах образцов, на легированном парамагнитном образце с концентрацией 3x10^17 см-3, выращенном методом МПЭ при нормальных температурах, а также на разбавленных магнитных образцах, выращенных методом низкотемпературной молекулярно-пучковой эпитаксии с концентрацией Mn 0.8% для парамагнитного разбавленного образца и от 1 до 5% для ФМ РМП образцов. На рисунке справа представлены температурные зависимости намагниченности для образца с концентрацией Mn 4.3%, выполненные методом СКВИД.
17. Экспериментальные результаты, полученные в данной главе, были получены методом НРСПС при нерезонансном возбуждении линейно или циркулярно поляризованным светом в геометрии Фойгта или Фарадея, соответственно. Возбуждено было нерезонансным и велось Kr ионным лазером (Также эта линия наблюдалась при возбуждении He-Ne и Ar лазерами) на энергии 1.916 эВ (647.1 нм, т.к. 1240/lambda). Слева представлен спектр неупругого рассеяния света в геометрии Фойгта во внешнем магнитном поле B=5 T в геометрии (sigma, pi) в образцах легированном R, а также ФМ разбавленном FM2 c концентрацией Mn 4.3% при Т=2К (красная кривая) и 160К (синяя кривая). Линия, представленная здесь, соответствует отрицательно заряженному иону Mn2+. Прежде в спектрах НРСПС она наблюдалась также в работе, которой посвящена 3 глава, этот рисунок я уже показывал, для легированного образца, выращенного методом Чохральского, при резонансном возбуждении A0X. А до этого она наблюдалась в работе В.Ф. Сапеги в 2001 году. Данная линия наблюдается только в спектрах, измеренных в скрещенной (sigma,pi) геометрии Фойгта, и отсутствует в точной геометрии Фарадея, однако отклонение падающего луча на 10-15 градусов от нормали к плоскости образца активирует эту линию в скрещенной циркулярной поляризации (sigma+, sigma-). (если магнитное поле приложено, то у света вектор электрического поля света параллельна для pi и перпендикулярно, для sigma, по отношению к B). Предполагая, что переход однородно уширен (как следствие, спектральная зависимость интенсивности линии перехода имеет форму кривой лоренца), получаем, что <…>. Т.к. фитуется лоренцом и ширина не зависит от магнитного поля => рассматриваем только однородное уширение. Неоднородное есть, но оно «скрыто» внутри линии, много меньше однородного. В данном случае неоднородное уширения будет связано с дисперсией g-факторов ионов Mn2+ (в разных частях образца). С ростом магнитного поля линии от каждого g-фактора должны разбегаться, но этого не наблюдалось. Отсюда можно заключить, что измеренная ширина линии НРСПС определяется исключительно однородным, а именно поперечным временем жизни подсистемы (T2) спина иона Mn2+. (множитель для пересчета в с-1 pi\*c/0.01\*delta\_E)
18. На рисунке справа, части (a), представлены зависимости энергетического сдвига линии НРСПС на ионе Mn2+ от магнитного поля для легированного образца R. Зависимость экстраполируется в нуль в обеих геометриях магнитного поля в диапазоне температур Т=1.7-170 К. Зависимость энергетического сдвига линии от магнитного поля в этом образце может быть представлена, как <…>, с g-фактором <…>, который не зависит от температуры. В части (b) представлены зависимости энергетического сдвига линии НРСПС на ионе Mn2+ от магнитного поля в обеих геометриях для образца FM2 при T=2K. Здесь видно, что зависимость экстраполируется к положительному смещению для геометрии Фойгта (красные треугольники) и отрицательному для геометрии Фарадея (синие кружки). С возрастанием температуры это смещение уменьшается и исчезает при T>Tc. Наклон (другими словами, g-фактор) также зависит от температуры.
19. Чтобы определить влияние температуры на g-фактор, мы измерили зависимость g-фактора в широком диапазоне температур, охватывающем ферромагнитную и парамагнитную фазы. (лучшая аппроксимация при 𝐻4 = 300 Э, 𝐻2 = −1100 Э.). На рисунке представлена температурная зависимость g-фактора, измеренная в геометрии Фойгта для образца FM2. Видно, что переход в ФМ фазу сопровождается уменьшением g-фактора ионов Mn2+ на 5%. Сплошная кривая на рисунке – результат аппроксимации данным выражением для эффективного g-фактора иона Mn2+, полученного в рамках теоретической модели, в которой (Ga,Mn)As представлен в виде двух взаимодействующих магнитных подсистем, подсистемы спинов ионов Mn2+ и и дырочной подсистемы, обменно взаимодействующих друг с другом, учитывающую поле анизотропии, спиновую диффузию, а также диссипацию дырочной подсистемы в формулировке Блоха. Теоретическая модель разработана Игорем Крайновым и Н.С. Аверкиевым. Обменное взаимодействие между подсистемами изменяет g-фактор и приводит к релаксации спина иона Mn2+.
20. На нижнем левом рисунке представлена зависимость скорости поперечной релаксации спина иона Mn от мнешнего магнитного поля для образца FM2. Видно, что gamma не зависит от магнитного поля в диапазоне 2-5Т, как ниже Tc (2К), так и выше (150К). Важной особенностью ФМ образцов является сильная зависимость от температуры ширины линии НРСПС, которая увеличивается с ростом температуры, как показано на верхнем рисунке для образцов с концентрацией Mn от 1 до 5%. Также на рисунке приведена зависимость от температуры для разбавленного, но парамагнитного образца с концентрацией 0.8%, из которого видна, что ширина линии для ПМ разбавленного образца не меняется в диапазоне 4…132К, как и в случае легированного образца. В ФМ образцах напротив, ширина линии практически не меняется при T<Tc и сильно возрастает при T>Tc. В наименее легированном ФМ образце с x=1% ширина линии при высоких температурах стремится к насыщению, величина которого сравнима с шириной линии ПМ разбавленного образца. На правом верхнем рисунке представлен результат аппроксимации в рамках теоретической модели согласно данному уравнению для скорости поперечной релаксации спина иона Mn2+. //tau\_Mn=56 пс для легированного образца и tau\_Mn=5.5 пс для парамагнитного РМП образца. В исследованном диапазоне температур скорость поперечной релаксации спина иона Mn характеризуется двумя режимами, ниже Tc основной вклад в скорость поперечной релаксации спина иона Mn связан с дефазировкой спина дырки из-за сильного спин-орбитального взаимодействия в валентной зоне GaAs. Дефазировка спина дырок приводит к релаксации спина Mn, т.к. спиновая подсистема дырок связана со спиновой подсистемой Mn. (или просто: ниже Tc время скорость <…> определяется спиновой релаксацией дырок за счет спин-орбитального взаимодействия). Выше Tc основной вклад в спиновую релаксацию Mn связан со спиновыми флуктуациями ансамбля дырок, которые растут с температурой.
21. На слайде представлены основные результаты, полученные в работе, описанной в данной главе.

1. Здесь представлены основные положения, выносимые на защиту.

* 𝑥 = 1 ÷ 10% (5% ≈ 10^21 см−3)
* Rho\_c =1 и rho\_c=5/7 – почему?
* Равновесная растворимость ~5%.
* Формула на 19 странице – знать, что есть что равновесная растворимость Mn в GaAs составляет порядка ∼ 0.05%. Выше этого уровня легирования происходит сегрегация Mn, приводящая к формированию кластеров ФМ MnAs
* СКЯ->Такое поведение поляризации ГФЛ связано с сильной анизотропией g-фактора свободной дырки в КЯ, который равен нулю ( 𝑔𝑥,𝑦 ∼ 0) в плоскости КЯ и 𝑔 ̸= 0 в направлении роста. [74] Следовательно, равновесная ориентация спина дырки достижима в геометрии Фарадея, а поляризация ГФЛ в этом случае может достигать максимального значения единицы. Напротив, в геометрии Фойгта не происходит зеемановского расщепления дырочных состояний, и ГФЛ не является поляризованной
* Не-Ne (632.8 нм), Kr (676.4 нм) и Ar (488 нм) лазеры
* Следует также отметить, что если бы дырки заполняли валентную зону, можно было бы ожидать намного большие значения степени циркулярной поляризации ФЛ в геометрии Фарадея и нулевую линейную поляризацию в геометрии Фойхта. Это связано с тем, что размерное квантование приводит к значительной анизотропии g-фактора дырки.
* Эксперименты в диапазоне температур 1.7÷200 K проводились в проточном гелиевом криостате с использованием магнитных полей до 5 Т
* Неоднородное уширение связано с дисперсией g-фактора Mn. Поскольку в ФМ образцах не наблюдалось зависимости ширины линии НРСПС от магнитного поля, можно заключить, что измеренная ширина линии НРСПС на ионе Mn2+ определяется исключительно однородным, а именно поперечным временем жизни подсистемы (𝑇2) спина Mn.
* Gamma\_Mn=2pi\*c/0.01 \* \delta\_E/2
* 𝜏𝑀𝑛 ≈ 56 пс для легированного образца, Mn (𝑥 = 0.8%) – ПМ - 𝜏𝑀𝑛 ≈ 5.5 пс.
* 𝐷 является коэффициентом спиновой диффузии, 𝜆 в 𝜆𝑆 и 𝜆𝐽 является константой молекулярного поля, описывающей обменное взаимодействие между подрешетками, и может быть оценена, используя выражение 𝜆𝑀 ∼ 𝐵eff. 𝐶𝑖 - константы, описывающие энергетический спектр спиновых волн. M0i является равновесной намагниченностью, Mi (𝑡) - однородная намагниченность и 𝛿M(𝑥, 𝑡) - флуктуации намагниченности. 𝛾ℎ - скорость поперечной релаксации спина дырки,