

- [2] J. de Jong, I. Razdolski, A. M. Kalashnikova, *et al.* *Phys. Rev. Lett.* **108**, 157601 (2012).
[3] L. le Guyader, M. Savoini, S. El Moussaoui, *et al.*, *Nature Communications* **6**, 5839 (2015).

Экситонная спектроскопия полупроводников методом генерации оптических гармоник

Д.Р. Яковлев

Физико-технический институт им. А.Ф. Иоффе РАН, С.-Петербург, Россия
Experimental Physics 2, TU Dortmund University, 44221 Dortmund, Germany

Генерация оптических гармоник (второй, третьей и более высоких) является широко распространенным методом исследования электронной структуры твердых тел и их нелинейных оптических свойств. Для генерации оптических гармоник материал подвергается воздействию мощного лазерного импульса с энергией фотонов $\hbar\omega$, которые в силу оптической нелинейности генерируют сигнал на удвоенной энергии (удвоенной частоте $2\hbar\omega$), утроенной энергии (утроенной частоте $3\hbar\omega$) и более высоких энергиях. Процесс генерации является когерентным и, в силу этого, оказывается очень чувствительным к симметрии кристаллической решетки, а так же к симметрии электронных состояний участвующих в процессе генерации гармоник, к магнитной симметрии в случае магнитных материалов, и т.д. При этом зачастую генерация оптических гармоник позволяет исследовать симметричные свойства материалов и их систем, которые не доступны методам линейной оптической спектроскопии.

Полупроводниковые материалы интенсивно исследовались методом генерации оптических гармоник. Однако, в большинстве работ использовался лазер с фиксированной энергией фотона. При этом как основная так и удвоенная энергия фотонов приходилась на зону прозрачности полупроводников, т.е. были меньше энергии запрещенной зоны. Исследования при которых удвоенная энергия фотонов сканировалась вблизи запрещенной зоны, там где оптические свойства в большой степени определяются экситонными резонансами, были крайне эпизодическими.

Задачей цикла исследований, представленных в этой лекции, являлась разработка методов экситонной спектроскопии основанной на эффекте генерации второй и третьей оптических гармоник. Основной целью являлся поиск новых эффектов и выявление микроскопических механизмов ответственных за эти эффекты. Исследования проводились на большом наборе полупроводников: диамагнитных GaAs, CdTe и ZnO, полумагнитных CdMnTe и магнитных EuTe и EuSe. Использовались низкие температуры (в основном температура жидко-

го гелия 4.2 Кельвина), сильные магнитные поля до 10 Тесла и электрические поля до 500 В/см. Основное внимание было уделено механизмам генерации гармоник индуцируемых магнитным полем. Для того, чтобы отчетливо наблюдать связанные с этим сигналы, выбирались геометрии эксперимента в которых свет распространялся вдоль высокосимметричных направлений кристаллической решетки. Это позволяло в большинстве случаев подавить кристаллографический вклад в сигнал генерации оптических гармоник.

В лекции будут представлены следующие эффекты:

- Механизм орбитального квантования носителей в магнитном поле приводящий к появлению сигнала генерации второй гармоники (ГВГ) на состояниях магнито-экситонов в диамагнитных полупроводниках GaAs и CdTe [1,2].
- Эффект гигантского спинового расщепления в полумагнитном полупроводнике CdMnTe, приводящем к ГВГ [3,4].
- Визуализация магнитного упорядочения и перехода между различными фазами магнитного порядка с повышением температуры и магнитного поля в магнитных полупроводниках EuTe и EuSe по спектрам ГВГ и генерации третьей гармоники [5,6,7].
- Магнето-Штарк эффект на свободном экситоне движущемся в магнитном поле, который ярко проявился в появлении сильного сигнала ГВГ в области $2s/2p$ экситонных состояний в ZnO, за счет смешивания этих состояний [9].
- ГВГ на экситонных состояниях в ZnO за счет модификации их симметрии в электрическом и магнитном полях [10].

Результаты представленные в этой лекции были получены в ходе плодотворного сотрудничества Кафедры экспериментальной физики технического Университета Дортмунда, Германия (I. Sanger, V. Kaminski, M. Lafrentz, D. Brunne, M. Bayer), ФТИ им. А.Ф. Иоффе (В.В. Павлов, Р.В. Писарев, А.В. Родина, А.М. Калашникова, В.А. Лукошкин) и Университета Сан-Пауло, Бразилия (A. B. Henriques). Структуры для этих исследований были предоставлены коллегами из Института физики Польской Академии Наук, Варшава, Польша (G. Karczewski, T. Wojtowicz, and J. Kossut), Университета Линца, Австрия (G. Springholz, G. Bauer), Национального института космических исследований, Бразилия (E. Abramof, P.H.O. Rappl) и Университета Брауншвайга, Германия (A. Bakin).

Литература

- [1] V. V. Pavlov, A. M. Kalashnikova, R. V. Pisarev, *et al.*, *Phys. Rev. Lett.* **94**, 157404 (2005).

- [2] I. Sanger, D. R. Yakovlev, B. Kaminski, *et al.*, *Phys. Rev. B* **74**, 165208 (2006).
- [3] I. Sanger, D. R. Yakovlev, R. V. Pisarev, *et al.*, *Phys. Rev. Lett.* **96**, 117211 (2006).
- [4] I. Sanger, B. Kaminski, D. R. Yakovlev, *et al.*, *Phys. Rev. B* **74**, 235217 (2006).
- [5] B. Kaminski, M. Lafrentz, R. V. Pisarev, *et al.*, *Phys. Rev. Lett.* **103**, 057203 (2009).
- [6] B. Kaminski, M. Lafrentz, R. V. Pisarev, *et al.*, *Phys. Rev. B* **81**, 155201 (2010).
- [7] M. Lafrentz, D. Brunne, B. Kaminski, *et al.*, *Phys. Rev. B* **82**, 235206 (2010).
- [8] R. V. Pisarev, B. Kaminski, M. Lafrentz, *et al.*, *Phys. Stat. Sol. (b)* **247**, 1498 (2010).
- [9] M. Lafrentz, D. Brunne, B. Kaminski, *et al.*, *Phys. Rev. B* **85**, 035206 (2012).
- [10] M. Lafrentz, D. Brunne, B. Kaminski, *et al.*, *Phys. Rev. Lett.* **110**, 116402 (2013).
- [11] M. Lafrentz, D. Brunne, A. V. Rodina, *et al.*, *Phys. Rev. B* **88**, 235207 (2013).

Бозонные лазеры

A.B. Кавокин

Physics and Astronomy School, University of Southampton, Southampton, UK
Spin Optics Laboratory, St Petersburg State University, Russia

Начало нового тысячелетия ознаменовалось появлением принципиально нового типа лазеров. Это так называемые бозонные лазеры, которые генерируют когерентное электро-магнитное излучение за счет спонтанных, а не стимулированных, как в обычных, фермионных, лазерах, переходов [1]. Спонтанное излучение когерентного света возможно, если источником является бозе–эйнштейновский конденсат. С середины 90-х годов XX века десятки лабораторий занимаются исследованием конденсатов свето-материальных квазичастиц: экситонных поляритонов. Эти частицы возникают в полупроводниковых структурах за счет оптической накачки или инжекции носителей заряда. Они сочетают свойства элементарных кристаллических возбуждений — экситонов, и квантов света — фотонов. Подчиняясь бозонной статистике, экситонные поляритоны формируют конденсаты: квантовые состояния, содержащие миллионы идентичных квазичастиц. Свет, излучаемый такими конденсатами, обладает всеми свойствами лазерного излучения, при этом пороговая мощность накачки бозонных лазеров на три порядка величины ниже порога обычных фермионных лазеров [2]. Одной из важных областей применения бозонных лазеров являются коммуникации на субмиллиметровых длинах волн (терагерцовых частотах). Этот частотный диапазон важен для линий беспроводных коммуникаций, в медицине (лечение рака), в системах безопасности (сканнеры). До сих пор не разработан компактный источник когерентного терагерцового излучения. Недавно в Санкт-Петербурге была предложена концепция бозонного каскадного лазера [3]: перестраиваемого лазера, излучающего субмиллиметровые волны. За счет каскадного эффекта квантовый