

МОДУЛЯЦИЯ ПРОХОЖДЕНИЯ ШИРОКОПОЛОСНОГО ТЕРАГЕРЦОВОГО ИЗ- ЛУЧЕНИЯ ПРИ ОДНОКРАТНОЙ ИОНИЗАЦИИ ДВУХЗАРЯДНОГО ДОНОРА

**Р. Х. Жукавин^{1*}, Д. А. Постнов^{1,2}, П. А. Бушуйкин¹, К. Е. Кудрявцев¹, К. А. Ковалев-
ский¹, В.В. Цыпленков¹, Н.А. Бекин¹, А.Н. Лодыгин³, Л. М. Порцель³, В.Б. Шуман³,
Ю.А. Астров³, Н.В. Абросимов⁴, В.Н. Шастин¹**

¹Институт физики микроструктур РАН, ул. Академическая, д. 7, д. Афонино, Кстовский
р-н, Нижегородская обл., 603087

²Национальный исследовательский Нижегородский государственный университет им.
Н.И. Лобачевского, просп. Гагарина, д. 23, г. Нижний Новгород, 603950

³Физико-технический институт им. А.Ф. Иоффе РАН, ул. Политехническая, д. 26, г.
Санкт-Петербург, 194021

⁴Institut für Kristallzüchtung (IKZ), Max-Born-Straße 2, Berlin 12489

*zhur@ipmras.ru

Аннотация

В работе представлены результаты измерений импульсного сигнала модуляции при ионизации доноров магния в кремнии при температуре жидкого гелия. Магний в кремниии является двухзарядным донором, что предполагает наличие в системе состояний, отличающихся суммарным спином двух электронов. Однократная ионизация доноров и последующий захват электронов формирует неравновесную населенность возбужденных состояний, что смещает полосу поглощению в область терагерцовых частот. Наблюдаемое время релаксации, соответствующее первому возбужденному состоянию системы, достигает миллисекунд и в представленном эксперименте ограничено фоновым излучением.

Введение

Двухзарядные доноры в кремнии представляют интерес ввиду наличия двух спиновых подсистем электронов, что может быть использовано в различных приложениях, однако они изучены в гораздо меньшей мере по сравнению с однозарядными донорами [1-4]. Очевидно, что процессы релаксации в таких центрах можно разбить на процессы с переворотом спина и без переворота спина, причем процессы с переворотом спина идут в силу величины спин-орбитального взаимодействия, которое зависит от химической природы донора. Среди двухзарядных доноров магний в кремнии обладает наименьшим значением спин-орбитального взаимодействия, следовательно, естественно предположить наличие большого времени релаксации первого возбужденного состояния, которое необходимо насытить каким-либо образом.

Энергия ионизации магния составляет 107.5 мэВ (Рис.1), [5, 6], следовательно, он может быть ионизован излучение с длиной волны 10.6 мкм, характерной для СО2 лазера.

Магний вводится в кремний путем диффузии [5], в результате чего может формироваться одиночный центр магния. На данном этапе отсутствует достаточный набор данных о временах жизни возбужденных состояний, контролируемых спонтанным излучением фононов для Si:Mg. При помощи метода «накачка-зондирование» было показано, что состояния $2p_0$ и $2p_{\pm}$ обладают достаточно быстрыми временами релаксации [6].

Данная работа ставила своей целью исследование времени релаксации первого возбужденного состояния донора, чья релаксация должна сопровождаться изменением суммарного спина двухэлектронной системы.

Эксперимент

Образцы монокристаллического кремния, легированного магнием были получены методом диффузии и имели концентрацию доноров порядка $N_d \sim 3 \times 10^{15} \text{ см}^{-3}$. были вырезаны в виде клина (порядка одного градуса) с апертурой $5 \times 7 \text{ мм}^2$ и толщиной около 2 мм с полировкой всех граней. В зависимости от эксперимента образцы помещались в криогенную вставку в гелиевом сосуде Дьюара (Рис.2). При измерении модуляции прохождения непрерывного планковского излучения с температурой $T=300 \text{ К}$ в качестве источника возбуждения использовался импульсный TEA CO₂ лазер ($\lambda=10.6$ микрон, $\hbar\omega=117 \text{ мэВ}$) с пиковой мощностью до $P=100 \text{ кВт}$ с длительностью импульса 100 нс и частотой повторения 5 Гц. В качестве детектора использовалось фотосопротивление Ge:Ga, а фильтрация излучения возбуждения осуществлялась постановкой кристаллического сапфира толщиной 1 мм.

Поглощение импульса излучения CO₂ лазера при прохождении образца ведет к ионизации доноров магния с последующим захватом свободных электронов и их релаксацией с формированием неравновесных населенностей примесных состояний, при этом при малых и средних интенсивностях возбуждения ($I < 10 \text{ кВт/см}^2$) наблюдается сигнал поглощения, обладающий экспоненциальным спадом.

Длительность сигнала фотомодуляции достигает 20 мс (Рис. 3) при температуре $T=4.2 \text{ К}$ жидкого гелия в условиях использования фильтров (сапфир, GaAs), уменьшающих фоновую подсветку образца. Были проведены исследования модуляции образцами нелегированного кремния, а также кремния, легированного фосфором с концентрацией доноров $N=2 \times 10^{15} \text{ см}^{-3}$. Данные образцы не демонстрировали временные отклики, аналогичные полученным для Si:Mg в диапазоне интенсивностей $I < 10 \text{ кВт/см}^2$.

Обсуждение

Как было указано выше, характерные времена релаксации спин-синглетных состояний магния достаточно быстрые, поэтому естественно предположить, что наблюдаемые времена соответствуют переходам между состояниями с различным суммарным спином. Как известно из теории донорных состояний в кремнии спин-орбитальное взаимодействие максимально для возбужденного состояния $1s(^3T_2)$ [7], однако из-за малого атомного номера магния величина спин-орбитального взаимодействия оказывается слабой, что приводит к замедлению релаксации нижнего состояния. Таким образом, авторы связывают измеренное в эксперименте по фотомодуляции время со временем релаксации самого нижнего ортосостояния $1s(^3T_2)$.

Как следует из полученных данных, применение различных фильтров приводит к изменению длительности полученных откликов. Такое обстоятельство вызвано ограничением используемой методики: в случае длинных времен релаксации само излучение фона начинает оказывать влияние на населенность долгоживущих состояний. Таким образом, для детектирования предельных времен релаксации необходима модификация экспериментальной методики, предлагающая заметно меньшее фоновое облучение образца. Полученный в данной работе результат, несмотря на указанные ограничения, указывает на механизм спиновой релаксации гелиеподобного донора магния в кремнии.

Заключение

Проведено исследование сигнала фотомодуляции в Si:Mg при фотоионизации доноров. Использование методики модуляции позволило наблюдать сигнал фотомодуляции, обладающий достаточно длинным временем релаксации (до 20 мс при 4 К). Сигнал поглощения излучения в терагерцовом диапазоне объясняется наличием спин-триплетного состояния $1s(^3T_2)$, чье время релаксации связано с малой величиной спин-орбитального взаимодействия.

Экспериментальные исследования, проведенные сотрудниками ИФМ РАН, были поддержаны в рамках госзадания (номер FFUF-2024-0019).

Авторы заявляют, что у них нет конфликта интересов.

Литература

1. A. DeAbreu, C. Bowness, R.J.S. Abraham, A. Medvedova, K.J. Morse, H. Riemann, N.V. Abrosimov, P. Becker, H.-J. Pohl, M.L.W. Thewalt, S. Simmons, Phys. Rev. Appl. **11**, 044036 (2019).
2. G. Bergman, G. Grossmann, H.G. Grimmeiss, Phys. Rev. Lett. **56**, 2827 (1986).
3. Thilderkvist, M. Kleverman, H.G. Grimmeiss, Phys. Rev. B **49**, 16338 (1994).
4. P. Wagner, J. Hage, Appl. Phys. A **49**, 123 (1989).
5. S.G. Pavlov, Y.A. Astrov, L.M. Portsel, V.B. Shuman, A.N. Lodygin, N.V. Abrosimov, H.W. Hübers, Mater. Sci. Semicond. Process. **130**, 105833 (2021).
6. N. Dessmann, S.G. Pavlov, A. Pohl, V.B. Shuman, L.M. Portsel, A.N. Lodygin, A. Astrov, N.V. Abrosimov, B. Redlich, H.-W. Hübers, Phys. Rev. B **106**, 195205 (2022).
7. T. G. Castner, Phys. Rev. **155**, 816 (1967).

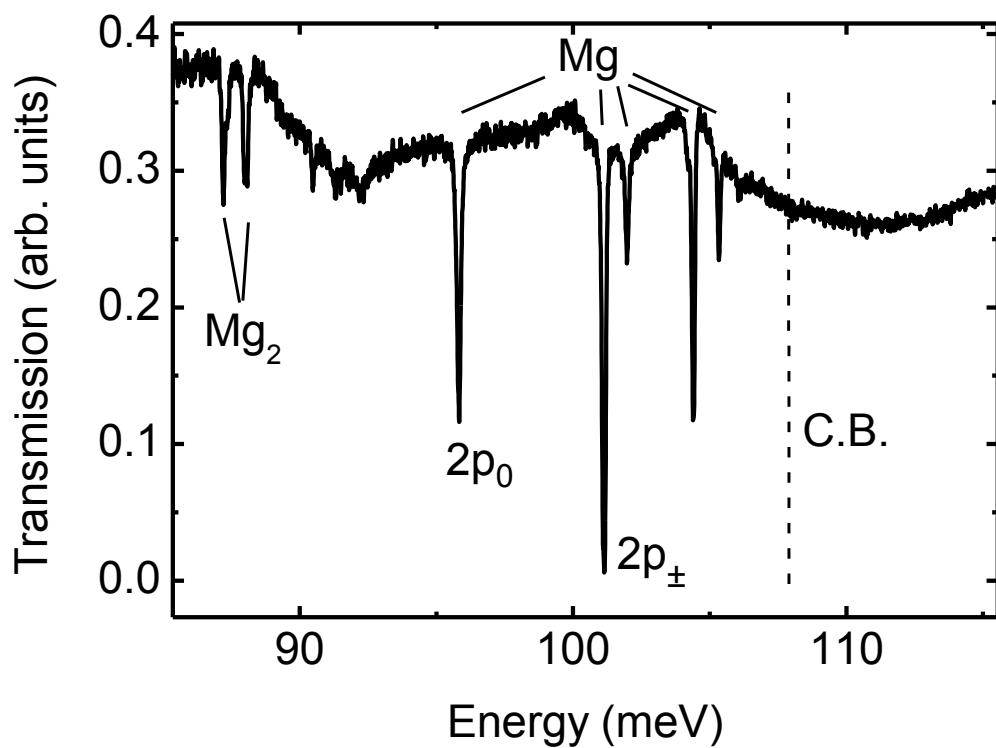


Рис. 1. Спектр пропускания двухзарядного донора в кремнии.

300 K radiation 117 meV

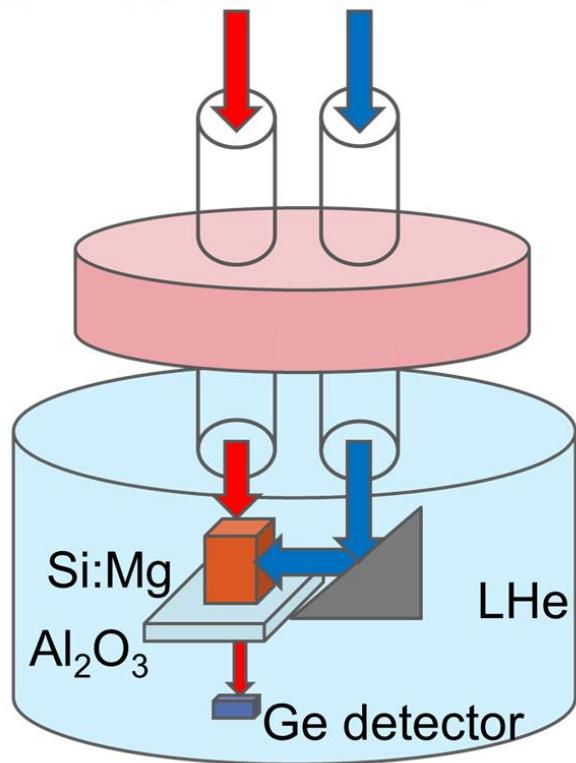


Рис. 2. Схема эксперимента по измерению сигнала модуляции поглощения.

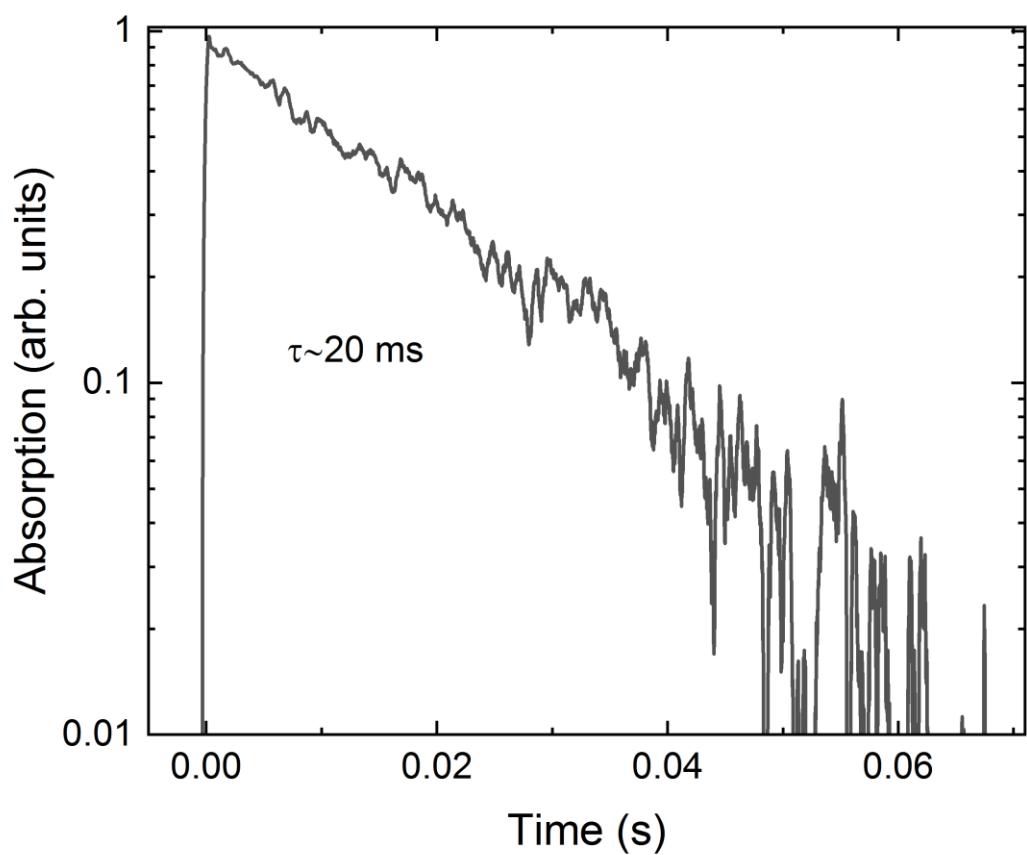


Рис. 3. Сигнал фотомодуляции фонового излучения для минимального значения интенсивности фонового излучения.