Активная среда на основе кремния, легированного магнием

Ковалевский К.А.¹, Шастин В.Н.¹, Жукавин Р.Х.¹, Цыпленков В.В.¹, Румянцев В.В.¹, Павлов С.Г.², Астров Ю.А.³, Абросимов Н.В.⁴, Klopff J.M.⁵, Hübers H.-W.^{2,6}

¹ Институт физики микроструктур РАН, 607680, Нижний Новгород, ул. Академическая, д. 8

² Institute of Optical Sensor Systems, German Aerospace Center, 12489, Berlin, Rutherfordstrasse 2

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

Политехническая, д. 26

⁴ Leibniz-Institut für Kristallzüchtung (IKZ), 12489, Berlin, Max-Born-Str. 2

⁵ Helmholtz-Zentrum Dresden-Rossendorf, 01328 Dresden, Bautzner Landstrasse 400

⁶ Department of Physics, Humboldt-Universität zu Berlin, 12489 Berlin, Newtonstr. 15

DOI 10.34077/Semicond2019-53

Результаты по стимулированному излучению в терагерцовом диапазоне частот при оптическом возбуждении доноров пятой группы в кремнии [1], дают надежду на расширение диапазона излучения путем использования доноров, у которых энергии переходов типа $2p \rightarrow 1s$ заметно отличаются. Одним из кандидатов на роль активных центров являются гелиоподобные центры магния [2] в кремнии. Литературные данные относительно энергий парасостояния $1s(E)$ в магнии указывали на величину порядка 52 мэВ [3], что позволяло рассчитывать на создание инверсии между состояниями $2p_0 \rightarrow 1s(E)$ (Рис.1). Однако, измеренные методом «*pump-probe*» времена релаксации состояний $2p$ дали малые значения ($\sim 10^{-11}$ с), что потребовало нового анализа механизмов формирования инверсии. В этом контексте важным оказалось нахождение положения нижележащих состояний $2s(A_1)$ и $1s(E, T_2)$, которые были либо не известны, либо имелись только косвенные данные [4]. Для исследования были выращены образцы кремния, легированного магнием $N_D \sim 1-3 \times 10^{15} \text{ см}^{-3}$ методом диффузии [5]. Измерения с использованием Фурье-спектрометра примесного поглощения при различных температурах $T=4-150$

Рис.1. – Схема уровней Si:Mg.

К и деформациях сжатия $S=0-2$ кбар, позволили нам идентифицировать энергии $1s(T_2, E)$ ортосостояний. А наличие резонансов Фано в измерениях спектров фотопроводимости позволило дополнить схему уровней магния данными об отщепленных парасостояниях $1s$. В результате энергии спин-триплетных состояний $1s(E)^{ortho}$ и $1s(T_2)^{ortho}$ составили ~ 47.5 мэВ и ~ 49.9 мэВ, а энергии спин-синглетных состояний $1s(E)^{para}$ и $1s(T_2)^{para}$ $\sim 38.6 \pm 1$ мэВ и ~ 41 мэВ соответственно. Оценки показали, что при полученных положениях уровней энергии $1s(E)^{para}$ и $1s(T_2)^{para}$ состояний быстрая релаксация $2p_0$ уже обусловлена переходами в состояние $2s$, энергия которого в двухзарядных центрах должна быть меньше, чем энергия $2p_0$. Причем скорость релаксации состояния $2s(A_1)$ может быть достаточной, чтобы рассчитывать на наблюдение эффекта вынужденного комбинационного рассеяния света на переходе $1s(A_1) \rightarrow 2s(A_1)$ (Рис. 1). Другая возможность – реализация ВКР света в магнии на переходе $1s(A_1) \rightarrow 1s(E)$, как это было продемонстрировано для доноров V группы в кремнии [1]. Напротив, реализация схемы с инверсией населенности на переходах $2p \rightarrow 1s$ видится трудно реализуемой из-за быстрых времен релаксации состояний $2p$ магния. Работа поддержана в рамках проекта РФФИ (19-02-00979) и совместного российско-германского проекта (No. 389056032 и 18-502-12077-ННИО).

[1] S.G. Pavlov et al., *Phys. Status Solidi B*, **250**, 9 (2013).

[2] H. G. Grimmeiss, E. Janz'en, and K. Larsson, *Phys. Rev. B*, **25**, 2627 (1982).

[3] A.K. Ramdas, S. Rodriguez, *Rep. Prog. Phys.*, **4**, 297 (1981).

[4] L.T. Ho, A.K. Ramdas, *Phys. Rev. B*, **5**, 462 (1972).

[5] Yu.A. Astrov et al., *Phys. Status Solidi A*, **214**, 1700192 (2017).