

УДК 537.9

Диэлектрические характеристики InP:Fe в терагерцовом и инфракрасном частотных диапазонах

Л.Н. Алябьева¹, М.А. Белкин², Е.С. Жукова¹, Б.П. Горшунов¹

1 Московский физико-технический институт (государственный университет), Россия

2 The University of Texas at Austin, USA

Полупроводники III-V группы играют важную роль в современной опто- и микроэлектронике. Фосфид индия InP широко известен благодаря своим важным оптоэлектронным свойствам таким как низкая эффективная масса, широкая запрещённая зона, высокая подвижность носителей заряда, большое время жизни и т.д. В настоящее время исследования различных параметров фосфида индия в терагерцовом диапазоне сфокусированы на изучении свойств квазиодномерных вискерков; анализе влияния температурного воздействия и бомбардирования InP мишеней протонами и ионами на время жизни носителей зарядов, подвижность и дефектную структуру в чистых и легированных кристаллах. Помимо этого легированный ионами железа InP является перспективным материалом для производства квантовых каскадных лазеров, работающих в терагерцовом диапазоне [1]. В связи с чем детальное изучение спектральных характеристик и диэлектрических свойств InP в терагерцовой области частот крайне важно.

Спектры отражения и пропускания (рис. 1) пластинок InP:Fe 990 мкм толщиной были измерены при комнатной температуре в широком диапазоне частот 2-700 см⁻¹ при использовании терагерцового спектрометра на лампах обратной волны, терагерцового спектрометра временного разрешения и инфракрасного фурье-спектрометра. Сопоставляя экспериментальные данные с моделью невзаимодействующих лоренцианов, удалось добиться качественного и количественного согласия, определить положения линий в спектрах и рассчитать характеристические параметры этих линий – диэлектрические вклады, константы затухания и силу осциллятора.

Номинально чистые кристаллы InP вследствие методов роста как правило содержат различные примеси. В зависимости от того, как именно выращивались кристаллы, в частности от тонких особенностей процесса, зависит количество и тип примесей. Наиболее часто встречающиеся примеси в InP это примеси донорного типа: кремний, сера, олово и германий и акцепторного: цинк, германий, кремний, марганец, бериллий и магний. Концентрации таких неотслеживаемых примесей достигают величины порядка 10¹⁶ см⁻³. Добавление примеси железа при росте кристалла позволяет добиться снижения концентрации неотслеживаемых примесей примерно на порядок величины, однако при наличии нескольких примесей одновременно, каждая из них в отдельности будет скомпенсирована в разной степени и заранее предсказать конечную концентрацию представляется несколько затруднительным.

Появление полос в спектре поглощения может быть обусловлено как процессами фононного взаимодействия [2], так и примесными или дефектными переходами [3]. Энергии ионизации наиболее распространенных примесей в InP составляют около 5-8 мэВ для S, Si, Sn, Ge, 25-40 мэВ для Zn, C, Si, Mn, Be, Mg. Энергии переходов, обусловленных дефектами в InP имеют энергии больше 100 мэВ, энергия ионизации примесного железа составляет 640 мэВ, таким образом, в исследованных нами спектрах эти переходы не наблюдаются.

InP содержит 2 атома в элементарной ячейке и, соответственно, имеет три акустические и три оптические фононные ветви. Причем продольные колебательные моды вырождены. Акустические фононы имеют почти нулевую энергию при околонулевой частоте и, следовательно, не вносят вклад в поглощение. Таким образом, в спектре поглощения ожидается только одна линия, обусловленная фононным резонансом на двукратно вырожденной поперечной оптической ветви. Наблюдаемое вблизи резонансной линии почти полное отражение падающего излучения называется эффектом остаточных лучей (reststrahlen effect).

Спектры действительной и мнимой частей диэлектрической проницаемости и спектр коэффициента поглощения (рис. 2) имеют сложную структуру, помимо очень мощной полосы фононного резонанса как в высокочастотной, так и в низкочастотной областях наблюдается

наличие большого числа линий переходов более низкой интенсивности. Линии в ИК области спектров обусловлены проявлением двухфононного суммарного поглощения, процесса, в котором поглощение кристаллической решёткой фотона сопровождается испусканием двух фононов. В более низкочастотной области спектра находятся линии разностного двухфононного поглощения – процесс, при котором поглощение фотона сопровождается поглощением одного фонона и испусканием одного фонона, а также особенности, обусловленные наличием мелких доноров и акцепторов.

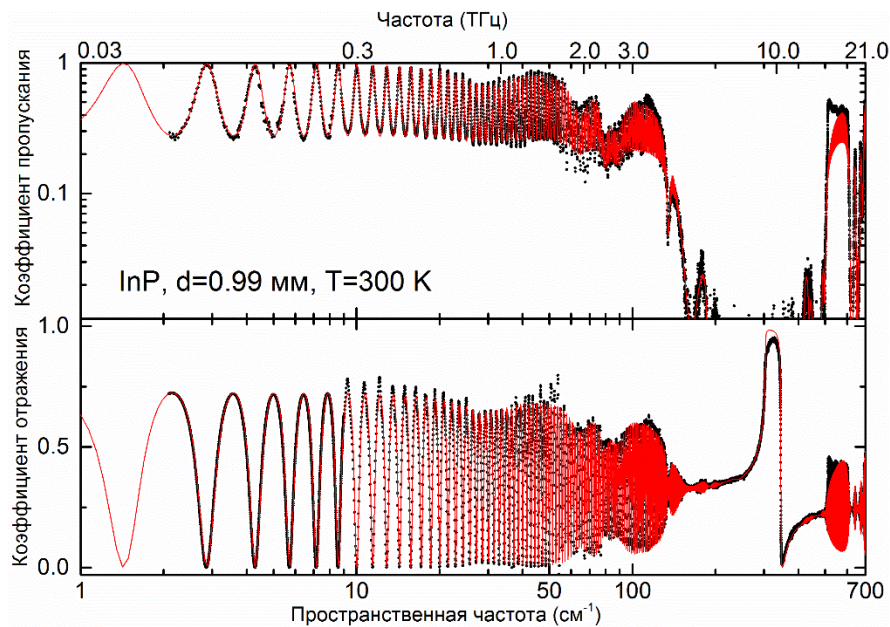


Рис.1 Спектры пропускания и отражения InP:Fe при комнатной температуре. Сплошные линии – теория, точки – экспериментальные данные.

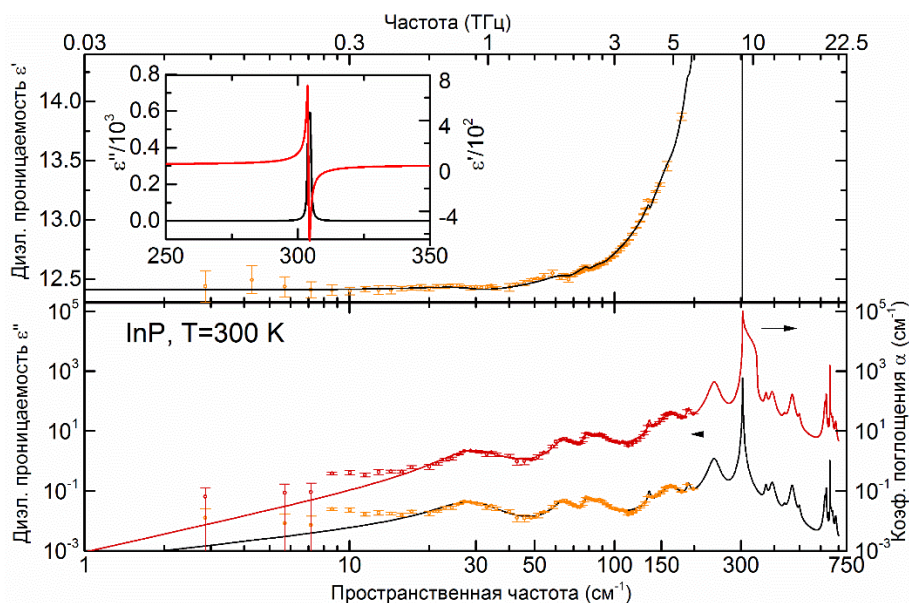


Рис. 2. Действительная и мнимая части диэлектрической проницаемости и коэффициент поглощения InP:Fe. Сплошные линии – теория, точки – экспериментальный расчет в терагерцовой области.

Литература

1. Jiang Y., Vijayraghavan K., Jung S., Demmerle F., Boehm G. Amann M.C., Belkin M.A. External cavity terahertz quantum cascade laser sources based on intra-cavity frequency mixing with 1.2-5.9 THz tuning range // Journal of Optics, 2014, V.16, P094002 (9pp).
2. Johnson, E. J., Willardson, R., & Beer, A. C.. Semiconductors and semimetals. Optical Properties of III–V Compounds, V.3. New York: Academic Press, 1967. 153 p.
3. Palik, E. D. Handbook of optical constants of solids V. 3. New York: Academic press, 1998. 999 p.