

Причиной деградации электрических характеристик контакта металл—GaAs, наряду с диффузией атомов металла в полупроводник, является нарушение стехиометрического состава поверхностного слоя арсенида галлия в результате взаимодействия с металлом и образование дефектов, индуцирующих поверхностные состояния в запрещенной зоне полупроводника.

Институт металлофизики
Академии наук УССР, Киев

Поступило
30 VI 1983

ЛИТЕРАТУРА

1. *Shue P.W., Lindau I., Pianetta P. et al.* — Phys. Rev. B, 1978, № 10, p. 5545–5549.
2. *Wal-drop I.P., Grout R.W.* — App. Phys. Lett., 1979, vol. 34, № 10, p. 630–632.
3. *Kinsbron E., Gallag-ner P.K., English A.T.* — Solid. State Electron., 1979, vol. 22, № 5, p. 517–524.
4. *Нефедов В.И.* — Поверхность. Физика, химия, механика, 1982, № 1, с. 4–21.
5. *Crowell C.R., Rideout V.L.* — Solid State Electron., 1969, vol. 12, p. 89–105.
6. Тонкие пленки. Взаимная диффузия и реакции/Под ред. Дж. Поута, К. Ту, Дж. Мейера. М.: Мир, 1982, с. 411–417.
7. *Parish M.B.* — J. Electrochem. Soc., 1967, vol. 114, № 5, p. 516–521.
8. *Хансен М., Андерко К.* Структуры двойных сплавов. М.: Гостехиздат, 1962, т. 1, с. 189; т. 2, с. 797.
9. *Эллиот Р.П.* Структуры двойных сплавов. М.: Металлургия, 1970, т. 1, с. 133.
10. *Щека И.А., Чаус И.С., Митюрева Т.Т.* Галлий. Киев: Гостехиздат, 1963. 296 с.
11. *Madams C.J., Morgan D.V., Howes M.J.* — Electron. Lett., 1975, vol. 11, № 24, p. 574–577.

УДК 539.143.4.537.226

Ф И З И К А

А.А. ВЕРТИЙ, Ю.П. ПОПКОВ, академик АН УССР В.П. ШЕСТОПАЛОВ

ВЛИЯНИЕ СПЕКТРАЛЬНОЙ ДИФФУЗИИ НА РЕЛАКСАЦИЮ СТАБИЛЬНОГО РАДИКАЛА НМВА Cr^V В 1,2-ПРОПИЛЕНГЛИКОЛЕ

В качестве основного материала для высокополяризованных протонных мишеней в настоящее время применяют органические соединения с высоким содержанием водорода и незначительным количеством парамагнитных примесей. Синтезированный в последнее время стабильный радикал НМВА Cr^V [1] находит широкое применение в качестве динамически поляризованных мишеней на отечественных и зарубежных ускорителях заряженных частиц. Тем не менее в литературе практически отсутствуют сведения по данному веществу, что затрудняет его практическое применение.

Для изучения процессов динамической поляризации ядер (ДПЯ) в условиях неоднородно уширенной линии ЭПР важной характеристикой является скорость электронной спин-решеточной релаксации. Спектральные исследования радикала НМВА Cr^V показали наличие слабой анизотропии *g*-фактора, что позволяет предположить существование неоднородного уширения линии поглощения [2].

Настоящая работа посвящена исследованию скорости спин-решеточной релаксации в данном веществе на частоте 130 ГГц при температуре жидкого гелия. Выбор частотного диапазона обусловлен в первую очередь тем, что для получения высокой ядерной поляризации при реально достижимых температурах в протонных мишенях применяются системы электромагнитной высокочастотной накачки, работающие в коротковолновой области миллиметровых волн. Кроме того, результаты спектроскопических и релаксационных исследований, полученные на этих частотах, в ряде

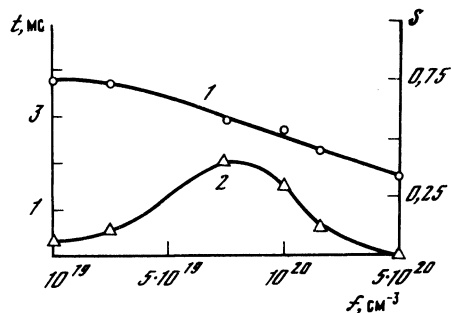
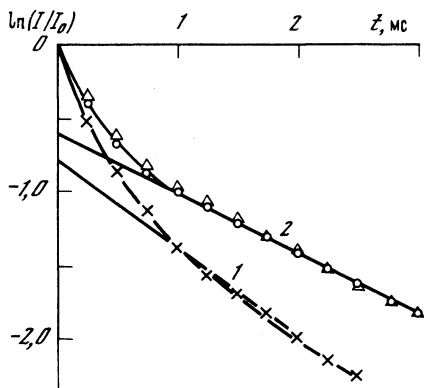


Рис. 1. Зависимость формы релаксационных кривых свободного радикала Cr^{V} в 1,2-пропиленгликоле при 4,2 К от длительности насыщающего импульса (1 – 7, 2 – 20 мс)

Рис. 2. Зависимость от концентрации времени спин-решеточной релаксации (1) и параметра неэкспоненциальности S при температуре 4,2 К (2) для свободного радикала Cr^{V} в 1,2-пропиленгликоле

случаев [3, 4] фактически моделируют динамические процессы на более низких частотах при сверхнизких температурах, что, во-первых, обеспечивает возможность проведения исследований при выполнении условия $h\nu/kT \geq 1$, а это является необходимым при изучении ДПЯ [5], и, во-вторых, значительно упрощает условия проведения низкотемпературного эксперимента.

1. Исследования проводились на квазиоптическом релаксметре проходного типа. Основным узлом релаксметра является высокочастотный открытый резонатор. Исследуемое вещество помещалось в специальной кварцевой кювете на одном из зеркал резонатора. Применение высокочастотного ОР и мощного источника – генератора дифракционного излучения (ГДИ) [6], обладающего уникальными характеристиками излученных колебаний (высокая стабильность, низкие шумы, чистый фурье-спектр излучения), позволяет насыщать спектральные переходы в веществах с концентрацией 10^{20} см^{-3} и более. В релаксметре использовался супергетеродинный приемник миллиметрового диапазона, в котором в качестве гетеродинного генератора также применен ГДИ [6].

2. Результаты измерения релаксационного процесса в радикале НМВА Cr^{V} в 1,2-пропиленгликоле представлены на рис. 1. Измерения производились при различных длительностях насыщающего импульса, температура образца во всех экспериментах составляла 4,2 К. Как видно из приведенных данных, релаксационные кривые в логарифмическом масштабе носят явно выраженный неэкспоненциальный характер. Такая форма кривой релаксации свидетельствует о наличии дополнительного канала утечки энергии из электронной спиновой системы. Известно, что отклонение от экспоненциальной зависимости может быть вызвано либо за счет перегрева резонансных фононов, либо вследствие процесса электронной кросс-релаксации (спектральной диффузии).

Как уже указывалось, в исследуемом радикале наблюдается неоднородное уширение линии поглощения ЭПР, обусловленное анизотропией g -фактора. Величина этой анизотропии составляет $\sim 10^{-3}$, что приводит к значительной ширине линии поглощения $2\delta_S$. В этой ситуации проявление эффекта перегрева резонансных фононов возможно лишь при условии независимости спиновых пакетов, составляющих линию поглощения. При этом ширина каждого пакета должна быть значительно меньше ширины линии. Анализ спектров ЭПР показывает, что в исследуемом случае ширина одного спинового пакета составляет около 7% ($\sim 30 \text{ Э}$) от общей ширины ли-

нии. Последнее свидетельствует о том, что механизм перегрева фононов в этих процессах не может объяснить наблюдаемые релаксационные явления. Кроме того, в случае указанного механизма форма релаксационной кривой не должна зависеть от длительности насыщающего импульса. В то же время следует ожидать сильного изменения от его амплитуды. Если же неэкспоненциальность релаксационного процесса связана с механизмом электронной кросс-релаксации в контуре неоднородно уширенной линии поглощения, то форма релаксационной кривой зависит от длительности насыщающего импульса и остается неизменной при изменении его амплитуды. Таким образом, экспериментально обнаруженное изменение формы прологарифмированных релаксационных кривых от длительности импульса насыщения (рис. 1) свидетельствует о наличии спектральной диффузии (с.д.) в исследуемом веществе. Этот вывод подтверждается еще и тем, что при изменении амплитуды импульса насыщения вид релаксационной кривой не изменяется.

3. Исследования концентрационной зависимости формы релаксационной кривой позволяют качественно проследить об относительном вкладе механизма с.д. в релаксационный процесс.

На рис. 2, 2 показана зависимость "фактора неэкспоненциальности" — S (метод определения S ясен из рис. 1) от концентрации. При концентрациях $\sim 10^{19} \text{ см}^{-3}$ вклад с.д. мал, поскольку неоднородно уширенная линия состоит из независимых спиновых пакетов. С ростом концентрации возрастает величина S и при $\sim 7,5 \cdot 10^{19} \text{ см}^{-3}$ достигает максимума, что обусловлено увеличением длины спектральной диффузии Δ_D . Затем при дальнейшем возрастании концентрации длина с.д. увеличивается и охватывает весь контур линии, что проявляется в уменьшении S . При $\sim 1,25 \cdot 10^{20} \text{ см}^{-3}$ релаксационная кривая становится практически моноэкспоненциальной. Для исследования скорости спин-решеточной релаксации в широком интервале изменения концентрации нами был применен метод "замораживания" с.д. [7]. Реализация этого метода в миллиметровом диапазоне была успешно осуществлена благодаря использованию в релаксаторе квазиоптического открытого резонатора, что позволило вводить в объем образца модулирующее магнитное поле с частотой 30 кГц.

Измеренная концентрационная зависимость (времени) спин-решеточной релаксации представлена на рис. 2, 1. Известно, что на высоких частотах $\sim 130 \text{ ГГц}$ при температуре 4,2 К основной вклад в спин-решеточную релаксацию дают однофононные процессы [4]. Однако, согласно теории Кронинга—Ван-Флека [8, 9], при прямых процессах скорость передачи энергии от спиновой системы к решетке не зависит от концентрации парамагнитных центров. Наличие слабой концентрационной зависимости скорости релаксации может быть обусловлено присутствием примеси Cr^{III} в радикале.

4. Полученные результаты позволяют выработать рекомендации по выбору оптимальной концентрации парамагнитных центров радикала $\text{HMVA Cr}^{\text{V}}$ при использовании этого вещества для поляризованных ядерных мишеней. Анализ, проведенный в [5], показывает, что для неоднородно уширенной линии поглощения и механизма динамического охлаждения [5] максимальное усиление ядерной поляризации при наличии с.д. оказывается возможным, если длина с.д. $\Delta_D \geq \delta_S$. Такая длина с.д. реализуется при концентрациях $> 1,25 \cdot 10^{20} \text{ см}^{-3}$, как видно из рис. 2, 2. С другой стороны, увеличение концентрации парамагнитных центров приводит к необходимости увеличивать мощность накачки для достижения высокой ДПЯ мишени. Поэтому оптимальной концентрацией, по-видимому, будет такая, при которой $\Delta_D \sim \delta_S$, т.е. $\sim 1,25 \times 10^{20} \text{ см}^{-3}$.

ЛИТЕРАТУРА

1. Krumpole M., de Boer B., Rosek J. – J. Amer. Chem. Soc., 1978, vol. 100, № 1, p. 145–153. 2. Вертий А.А., Шестопалов В.П., Попков Ю.П. и др. – ДАН, 1981, т. 260, № 5, с. 1093–1095. 3. Песковацкий С.А., Шульга В.М. – ФТТ, 1971, т. 13, вып. 12, с. 3608–3615. 4. Шевченко А.К. – ФТТ, 1970, т. 12, с. 3537–3542. 5. Ацаркин В.А. Динамическая поляризация ядер в твердых диэлектриках. М.: Наука, 1980, с. 195. 6. Шестопалов В.П. Дифракционная электроника. Харьков: Изд-во Харьковск. гос. ун-та, 1976, с. 231. 7. Дараселия Д.М., Епифанов А.С., Маненков А.А. – ЖЭТФ, 1970, т. 59, вып. 2 (8), с. 445–456. 8. De Kronig R.L. – Physica, 1939, vol. 6, p. 33. 9. Van-Vleck J.H. – Phys., Rev., 1940, vol. 57, p. 426.

УДК 621.382

ФИЗИКА

А.А. ИГНАТОВ

ОБ ЭФФЕКТЕ ОТРИЦАТЕЛЬНОЙ ДИФФЕРЕНЦИАЛЬНОЙ ПРОВОДИМОСТИ В КВАЗИДВУМЕРНЫХ ПОЛУПРОВОДНИКОВЫХ СВЕРХРЕШЕТКАХ

(Представлено академиком А.В. Гапоновым-Греховым 21 IV 1983)

1. Локализованный характер движения носителей тока в минизонах полупроводниковых сверхрешеток (СР), обусловленный интенсивным электрическим полем, определяет ряд интересных нелинейных эффектов, и, в частности, эффект отрицательной дифференциальной проводимости (ОДП) [1, 2]. Наиболее изученным вариантом СР является одномерная система, состоящая из чередующихся слоев материалов с различной шириной запрещенной зоны [3]. С другой стороны, в недавних работах [4–6] предложен квазидвумерный вариант СР на основе размерно-квантованных слоев GaAlAs с ограниченной по двум направлениям энергетической минизонной и с фиксированной энергией в направлении, перпендикулярном слоям,

$$(1) \quad \epsilon(p) = \Delta - \frac{\Delta}{2} \left(\cos \frac{p_x d}{\hbar} + \cos \frac{p_y d}{\hbar} \right);$$

здесь ϵ – энергия электронов в минизоне, p_x, p_y – компоненты квазиимпульса частиц вдоль поверхности слоя, 2Δ – ширина минизоны, d – период СР.

Достаточно быстрый процесс "сброса" энергии электронами из-за рассеяния на оптических фононах в двумерной ситуации и ограниченность движения частиц по всем трем направлениям квазиимпульса, значительно уменьшающая вероятность ухода в вышележащие минизоны [6], определяет интерес к этим структурам с точки зрения реализации эффекта ОДП. Для исследования статической вольт-амперной характеристики (ВАХ) структуры и корреляционной функции флуктуаций скорости авторами [6] проведены численные эксперименты с использованием метода Монте-Карло. Однако несмотря на то, что техника численного моделирования нелинейного отклика и флуктуационных характеристик полупроводниковых структур достаточно хорошо развита, остается открытым вопрос об интерпретации полученных данных и описании квазидвумерных СР в рамках простой модели, которая давала бы возможность исследовать частотную область существования эффекта ОДП и провести оптимизацию параметров структуры с точки зрения использования этого эффекта для генерации микроволнового излучения.