

537.3(41.33(049.3))

## ТЕРМОСТИМУЛИРОВАННАЯ РЕЛАКСАЦИЯ В ТВЕРДЫХ ТЕЛАХ

*Thermally Stimulated Relaxation in Solids*/Ed. P. Bräunlich.— Berlin; Heidelberg; New York: Springer-Verlag, 1979.— 331 p.— (Topics in Applied Physics, V. 37).;

Термостимулированной релаксацией (ТСР) называют процесс ускорения приближения к равновесию долгоживущего возбужденного состояния системы при повышении температуры. Исследование таких процессов породило большое число методик, позволяющих определять энергии активации, скорости переходов и плотность состояний.

В физике полупроводников наиболее популярны методы термостимулированной люминесценции (ТЛ) и термостимулированной проводимости (ТСП). Сущность их в следующем. При низкой температуре образец освещается в области собственного поглощения, и фотовозбужденные носители заряда захватываются на локализованные уровни в запрещенной зоне. Для достаточно глубоких уровней такое состояние очень долгоживущее. При повышении температуры носители возбуждаются в соответствующие зоны, а затем рекомбинируют — процесс ТСР. За время жизни в зоне носители дают вклад в измеряемый ток — метод ТСП; при излучательной рекомбинации — измеряется ТЛ.

Благодаря сравнительной простоте экспериментальной реализации и легкости качественной интерпретации методы ТСР очень широко используются для определения параметров локальных уровней. За последние годы методы ТСР стали количественными — традиционные методы ТСР достигли более высокого уровня и появились новые методики. Именно эти обстоятельства вызвали появление рецензируемой книги.

В рецензируемом сборнике из шести монографических обзоров рассмотрено исчерпывающим образом современное состояние применения методов ТСР к изучению электронных свойств полупроводников и диэлектриков.

1. П. Браунлих, «Введение и основные принципы». Излагаются основы теории метода ТСР, общие для всех его модификаций: обосновываются и записываются уравнения кинетики релаксации неравновесных носителей заряда в изотермических и неизотермических условиях. Затем перечисляются методы ТСР для исследования свойств ловушек в полупроводниках и диэлектрических характеристик в диэлектриках. В заключение приведены логические диаграммы методов ТСР и кратко изложены основные математические аспекты решения соответствующих задач.

2. П. Браунлих, П. Келли, Ж.-П. Филар, «Термостимулированная люминесценция и термостимулированная проводимость». После исторического введения излагаются необходимые теоретические сведения: понятие о глубоких, мелких и промежуточных по энергии локальных состояниях; их участие в процессах термоактивированных явлений переноса; представление о различных типах рекомбинации; и, наконец, основные модели для расчета процессов ТЛ и ТСП и процедура извлечения параметров локальных центров из экспериментальных данных.

Приведены многочисленные экспериментальные данные, полученные методами ТЛ и ТСП, в частности, различные тесты справедливости определенных моделей процесса. В последнем разделе «Экспериментальная техника» описаны способы программированного изменения температуры; применяемые криостаты и подогреватели; способы возбуждения образцов; методы электрических и оптических измерений и аппаратные методы сбора и анализа полученной информации. Библиография содержит 302 названия, в том числе большое количество ссылок на советских авторов.

3. Д. В. Лэнг, «Спектроскопия областей пространственного заряда (ОПЗ) в полупроводниках». Этот обзор самый интересный и посвящен наиболее важному в настоящее время методу ТСР.

Очень физично изложены основы спектроскопии ОПЗ. Исследуемые объекты: ОПЗ в контакте Шоттки и ОПЗ в слаболегированном полупроводнике в  $p$ - $n$ -переходе. Спектроскопия ОПЗ является количественным методом, позволяющим определять: уровни энергии центров захвата электронов и дырок, сечения захвата, профиль концентрации глубоких уровней.

ОПЗ, смещенная в зазорном направлении, может быть возбуждена различным образом, например, в  $p$ - $n$ -переходе посредством «импульса основных носителей». Для этого уменьшают запирающее смещение, а затем снова восстанавливают его значение ( $V$ ). Электроны захватываются на ловушки при уменьшении  $V$ , а после его восстановления происходит их термогенерация в зону проводимости и быстрый вынос электрическим полем за пределы ОПЗ. Кинетика термогенерации может быть измерена по релаксации емкости или переходного тока. Возможна инжекция и неосновных носителей, а также возбуждение светом, теплом и т. д.

Далее описана идея «завоевавшего мир» метода нестационарной спектроскопии глубоких уровней (НСГУ), предложенного Лэнгом в 1974 г. В методе НСГУ используется принцип «окна для скорости генерации носителей». Производится развертка температуры во времени и подается последовательность импульсов смещения на систему. Имеется специальная схема, НСГУ-спектрометр, которая реагирует только когда скорость релаксации (генерации носителей) принимает значения в определенной области. Результатом является спектр НСГУ (по ТСП-емкости или ТСП-току) в виде последовательности пиков, позволяющий определить количественно многие характеристики глубоких уровней.

В последних разделах обзора описана измерительная аппаратура для реализации методов ОПЗ-спектроскопии и схема НСГУ-спектрометра.

В настоящее время метод НСГУ находится на подъеме: с помощью него получено много количественных сведений, имеется несколько существенных модификаций, обнаруживаются новые возможности метода.

4. Ж. Вандершурен, Ж. Гасиот, «Токи термодеполяризации». Очень детальный обзор (90 стр.) метода ТСП, при котором возбуждение создается зарядением или поляризацией сэндвич-структуры при низкой температуре. Описаны: теории метода и его модификаций; полученные результаты; экспериментальные методики; аппаратура; предосторожности, необходимые при проведении опытов.

5. Х. Глэфке, «Экзоэмиссия» (ЭЭ). Под этим названием объединены многочисленные плохо понятые до сих пор нестационарные явления испускания частиц и фотонов с поверхностей твердых тел, возбужденных различным образом. К теме сборника относится непосредственно только термостимулированная ЭЭ, но чтобы не дробить обзор, он весь помещен в данном сборнике. Обзор содержит: изложение экспериментальных фактов, описание способов возбуждения ЭЭ, теоретические модели. В конце, очень кратко, описаны применения ЭЭ, в том числе предложенная Крамером фотография на основе ЭЭ из окисленного Al.

6. Л. А. Деверд, «Применения термостимулированной люминесценции». Здесь описаны: приготовление и свойства ТЛ-материалов; применение ТЛ в дозиметрии излучений, в том числе в медицинских целях; установление с помощью ТЛ геологических и археологических дат.

Помимо богатой библиографии в обзорах, в конце сборника приложен дополнительный список литературы по отдельным вопросам, содержащий работы до 1978 г.

В целом сборник оставляет очень хорошее впечатление. Написан он примерно на уровне лекций для физиков-экспериментаторов.

В. Б. Сандомирский