

СПЕКТРОМЕТР ДОПЛЕРОВСКОГО УШИРЕНИЯ АННИГИЯЦИОННОЙ ЛИНИИ

К. Ли, Ю. С. Бордулев, Р. С. Лаптев

Научный руководитель: Бордулев Ю. С.

Национальный исследовательский Томский политехнический университет,

Россия, г. Томск, пр. Ленина, 30, 634050

E-mail: libeichen@hotmail.com.tw

DOPPLER BROADENING SPECTROMETER

K. Lee, Yu. S. Bordulev, R. S. Laptev

Scientific Supervisor: Yu. S. Bordulev

Tomsk Polytechnic University, Russia, Tomsk, Lenin str., 30, 634050

E-mail: libeichen@hotmail.com.tw

***Annotation.** Positron annihilation (PA) techniques provide arrangements for precision studies of defect and electron structure of materials in materials science. Doppler broadening (DB) method is one of the three basic methods of PA. It gives information about the distribution of electrons by magnitude in the material and various types of defects. The law of momentum conservation in the process of PA can be expressed in the momentum transfer of the electron-positron pair to the annihilation photons pair. Thus, the shift of annihilation photons' energy (Doppler broadening) carries information about the momentum of the electron, which have taken place in the process of annihilation. It is useful to study the electron structure of the material, as well as for the defects' studies. This paper contains a description of the DB spectrometer developed at the Department of General Physics of TPU.*

В настоящее время позитроны широко применяются для изучения разнообразных структурных и электронных свойств вещества и различных процессов, протекающих в них. Методы электрон-позитронной аннигиляции (ЭПА) зарекомендовали себя как эффективные лабораторные инструменты для прецизионных исследований электронной и дефектной структуры материалов в физике твердого тела и материаловедении [1]. Метод спектроскопии доплеровского уширения аннигиляционной линии (ДУАЛ), являющийся одним из трех основных методов ЭПА, дает информацию об импульсном распределении электронов в материале и дефектах различного типа [2]. Процесс аннигиляции позитрона и электрона с высокой долей вероятности сопровождается испусканием двух γ -квантов. В системе центра масс аннигилирующей пары, суммарный импульс электрон-позитронной пары равен нулю. Таким образом, два аннигиляционных γ -кванта обладают энергией покоя электрона (511 кэВ), и испускаются в противоположных направлениях. В случаях, когда энергия аннигилирующей пары (большую часть которой составляет энергия электрона) не равна нулю, по закону сохранения энергии и импульса до и после процесса аннигиляции, у испускающихся γ -квантов будет наблюдаться сдвиг по энергии относительно линии 511 кэВ (Доплеровский сдвиг). Метод ДУАЛ основывается на обработке энергетических спектров аннигиляционной линии для исследуемого материала.

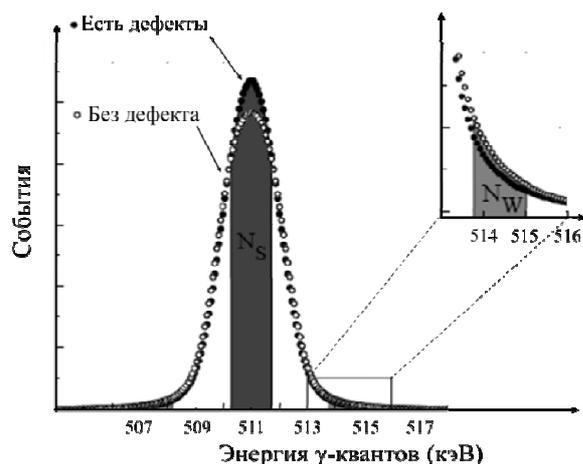


Рис. 1. Сравнение формы спектров
Допплеровского аннигиляционной линии

Позитроны, захваченные в открытых объемных дефектах, оказывают непосредственное влияние на доплеровское уширение спектра аннигиляционной линии $N_D = F(E)$, как показано на Рис. 1. Есть два параметра для описания спектров ДУАЛ. Параметр S , так называемый валентный параметр аннигиляции, рассчитывается как количество событий центральной области низких импульсов спектра, N_S , деленное на общую площадь всей кривой N_D [1].

Также имеется параметр W , или параметр аннигиляции ядра. Данный параметр рассматривается в области высокого импульса спектра, как показано на Рис. 1. Он определяется как число событий в фиксированном интервале энергий N_W в центральной части спектра, разделенной на N_D .

S и W параметры реагируют на тип и концентрацию дефектов. Например, как видно из представленного Рис.1., спектр дефектного образца более узкий и высокий, чем спектр бездефектного образца. Параметр W является более чувствительным к химическому окружению места аннигиляции позитрона. Это связано с тем, что остовные электроны имеют высокие импульсы. Анализ S и W параметров позволяет делать выводы также о типе дефектов, преобладающих в материале [3]. В некоторых случаях, значения S -параметра могут быть использованы для расчета концентрации дефектов в материале [4]. Химическое окружение места аннигиляции позитрона можно исследовать, используя высоко-импульсную часть спектра с применением схемы совпадений ДУАЛ. Это позволяет идентифицировать вакансии и вакансионные дефекты, связанные с атомами примеси.

Для получения позитронов в данном спектрометре используется β -активный радиоизотоп ^{44}Tl . Данный изотоп обладает рядом преимуществ по сравнению с ^{22}Na , традиционно используемым в методах ЭПА:

- большой выход позитронов 0,94;
- большая максимальная энергия позитронов 1,47 МэВ позволяет исследовать более глубокие слои вещества;

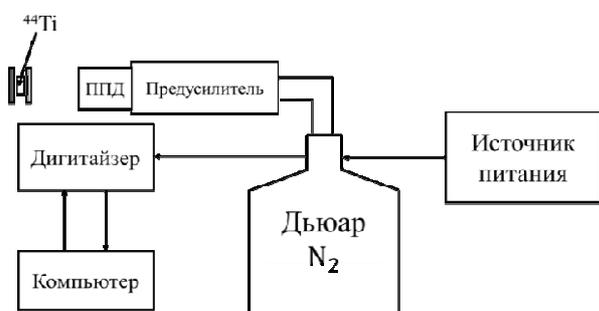


Рис. 2. Схема спектрометра доплеровского
уширения аннигиляционной линии

- период полураспада 47 лет и более высокая механическая прочность ввиду наличия закрытой титановой капсулы продлевает срок службы данного источника и повышает безопасность его использования.

Схема спектрометра представлена на Рис. 2. Спектрометр состоит из:

- детектора из особо чистого германия (ОЧГ) с системой охлаждения из жидкого азота;

- высокоскоростного дигитайзера (Agilent Technologies, 12-битный, частота дискретизации 420 Мвыб/с);
- программного обеспечения (ПО) для сбора и обработки сигналов [5].

Амплитуда импульса, генерируемого усилителем при регистрации γ -квантов в детекторе пропорциональна энергии зарегистрированного фотона. Сигнал с детектора направляется непосредственно на дигитайзер. Серия зарегистрированных импульсов оцифровывается и собирается в буфере дигитайзера, после чего пакетами посылается на жесткий диск компьютера.

Фильтрация импульсов и оценка энергии γ -квантов по высоте импульса происходит при помощи специализированного ПО. После этого формируется энергетический спектр, который может быть использован для оценки параметров формы S, W и R. Для оценки разрешения спектрометра используется ширина на полувысоте (FWHM—full width on a half of maximum) линии 1157 кэВ энергетического спектра. Разрешение данного спектрометра составило 2 кэВ, что в 1,5 раза меньше разрешения линии 511 кэВ (ввиду отсутствия Доплеровского уширения). Из набранного энергетического спектра «вырезается» линия 511 кэВ для анализа вклада валентных и остовных электронов в спектр аннигиляции.

Заключение. Таким образом, спектрометр доплеровского уширения аннигиляционной линии, разработанный на кафедре ОФ ТПУ позволяет исследовать электронную и дефектную структуру материалов в физике твердого тела и материаловедении. Благодаря применению детекторов из особо чистого германия и высокоскоростной системы сбора и преобразования данных, данный спектрометр имеет хорошее энергетическое разрешение (около 2 кэВ). Это делает его более предпочтительным по сравнению с методом угловой корреляции аннигиляционных фотонов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

4. Krause-Rehberg R., Leipner H. S. Positron Annihilation in Semiconductors. – Heidelberg: Springer, 1999. – 378 p.
5. Бордулев Ю. С. Реализация и применение методов электрон-позитронной аннигиляции для исследования дефектной структуры материалов: Магистерская диссертация. - Томск, 2013. – 95 с.
6. Mantl S., Triftshäuser W. Defect annealing studies on metals by positron-annihilation and electrical resistivity measurement // Physical Review B. – 1978. – V. 17. – № 4. – P. 1645 – 1652.
7. Liszka L., Corbel C., Baroux L., Hautojärvi P., Bayhan M., Brinkman A. W., Tatarenko S. Positron trapping at a small vacancy cluster in thin polycrystalline CdTe films deposited on glass // Applied Physics Letters. – 1994. – V. 64. – № 11. – P. 1380 – 1382.
8. Čížek J., Vlček M., Procházka I. Digital spectrometer for coincidence measurement of Doppler broadening of positron annihilation radiation//Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A. – 2010. – V. 623. – P. 982-994.