

# К ВОПРОСУ О ПОВЫШЕНИИ РАЗРЕШАЮЩЕЙ СПОСОБНОСТИ МЕТОДА НЕСТАЦИОНАРНОЙ ЕМКОСТНОЙ СПЕКТРОСКОПИИ ГЛУБОКИХ УРОВНЕЙ

Чихрай Е. В., Абдуллин Х. А.

Метод нестационарной емкостной спектроскопии глубоких уровней (НЕСГУ), впервые предложенный в работе [1], в настоящее время является важным инструментом при исследовании спектра глубоких уровней в различных полупроводниковых материалах. Существует обширная литература, посвященная методике НЕСГУ и ее различным модификациям, расширяющим возможности метода. Однако вопрос повышения разрешающей способности метода НЕСГУ исследован недостаточно.

Задача повышения разрешающей способности метода НЕСГУ сводится к требованию максимального разделения двух близко расположенных пиков в спектрах. Традиционно используемые в НЕСГУ коррелометры с весовыми функциями типа «ВОХСАР», «LOCK-IN» и т. д. обладают низкой добротностью [2, 3]. Не дает выигрыша в разрешающей способности и метод Фурье-НЕСГУ [4]. Наибольшим разрешением до настоящего времени обладали коррелометры со знакопеременными весовыми функциями, предложенными в работе [3], но и такого разрешения оказывается недостаточно для сложных спектров, часто встречающихся на практике.

Проблема решается довольно легко, если заметить, что аналитическое выражение коррелометрического преобразования релаксационного сигнала от глубокого уровня с энергией активации  $E_x$  и сечением захвата  $\sigma_n$  представляет собой линейное интегральное уравнение Фредгольма 1-го рода:

$$Aw = \int_0^{t_n} C(T, t) w(t) dt = U(t), \quad (1)$$

где  $C(T, t) = \Delta C \exp[-T^2 B \sigma_n t \exp(-E_x/kT)]$  — ядро уравнения (1) — релаксационный сигнал НЕСГУ,  $w(t)$  — весовая функция коррелометра,  $U(T)$  — спектр НЕСГУ,  $T$  — температура,  $t$  — время,  $k$  — постоянная Больцмана,  $B$  — константа. Если задаться конкретными параметрами глубокого уровня, то, выбирая конкретную форму линии спектра НЕСГУ (т. е. фактически задавая разрешающую способность) и решая уравнение (1) относительно функции  $w(t)$ , мы найдем оптимальную весовую функцию, обеспечивающую заданное разрешение.

Задача решения линейного интегрального уравнения Фредгольма 1-го рода относится к классу некорректных и решается приближенно регуляризующими методами [5, 6], основывающимися на дополнительной информации относительно решения. Метод регуляризации Тихонова [6] использует предположение о гладкости и непрерывности решения  $w(t)$ . Согласно этому методу, решение уравнения (1) есть функция  $w(t)$ , обеспечивающая минимум функционала

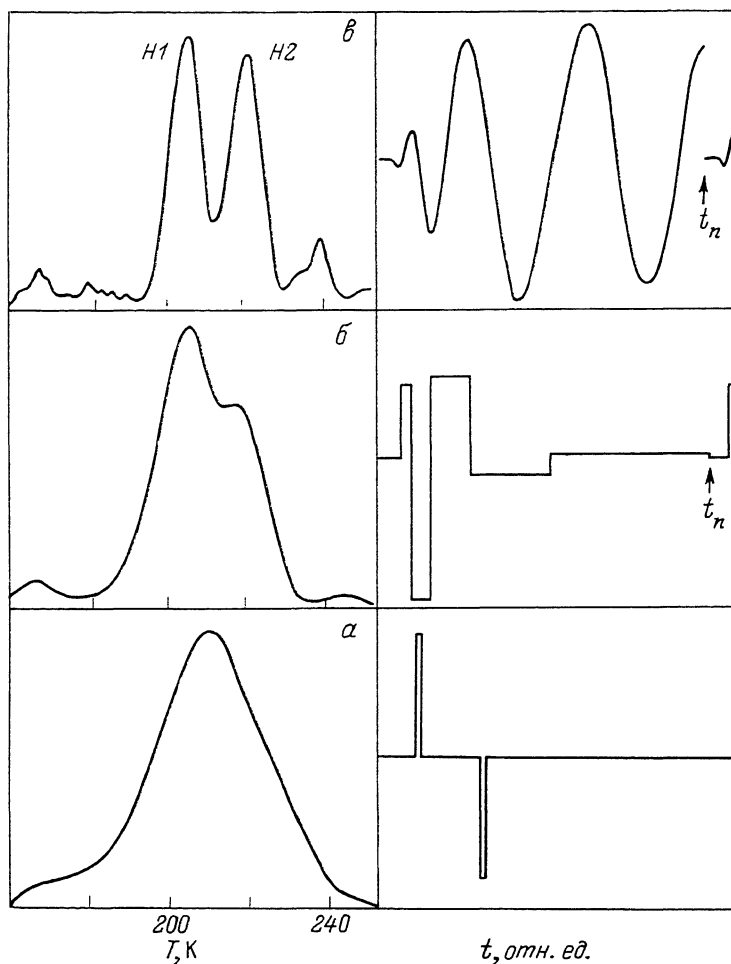
$$M^\alpha(w, U) = \|Aw - U\|^2 + \alpha \Omega(w),$$

где

$$\Omega(w) = \int_0^{t_n} [p(t)w^2(t) + k(t)(w'(t))^2] dt$$

при выбранном по одному из критериев параметре регуляризации  $\alpha$ ,  $p(t)$ ,  $k(t)$  — непрерывные функции. Таким образом, в качестве приближенного решения берется наиболее гладкое. Для численного решения задачи нами использовался (после некоторой модификации) специализированный пакет программ PMON, разработанный в отделе интегральных уравнений ВЦ МГУ.

В результате был получен широкий набор решений  $w(t)$  — весовых функций коррелометра НЕСГУ, обладающих различной разрешающей способностью: от классической (уровня ВОХСАР) до позволяющей разделять два модельных уровня с равными энергиями активации и различающимися в 2 раза сечениями захвата. Для экспериментальной проверки полученных решений нами исследовался образец кремния  $p$ -типа проводимости, выращенный методом Чохральского и со сформированным барьером Шоттки. Дефекты вводились облучением



Справа изображены весовые функции:  $a$  — типа ВОХСАР,  $b$  — из работы [3],  $c$  — полученная в настоящей работе; слева — спектры НЕСГУ, записанные с помощью соответствующих весовых функций (образец  $p$ -Si, облученный  $\alpha$ -частицами).

$\alpha$ -частицами. Как известно из литературы, в таких образцах основным дефектом по спектрам НЕСГУ является  $K$ -центр ( $C_i-O_i$ ). В работах [7, 8] показано, что образование  $K$ -центра идет через метастабильное состояние, близкое по энергии к  $K$ -центру. Спектры, показанные на рис. 1, были записаны с использованием известных ( $a$  и  $b$ ) и одной из полученных в настоящей работе ( $c$ ) весовых функций. Видно значительное повышение разрешающей способности, позволяющее разделять пики в спектрах и получать значения энергии активации для каждого из уровней. Отметим незначительное понижение амплитуды сигнала при заметном увеличении разрешающей способности.

При использовании полученных весовых функций высокого разрешения встает вопрос о снижении уровня шума в релаксационных сигналах, чувствительность к которому возрастает при росте разрешения. Поэтому перспектив-

ным является использование цифровоаналогового коррелометра с программированием весовой функции от компьютера [9], обладающего оптимальными шумовыми характеристиками.

#### Список литературы

- [1] Lang D. V. // J. Appl. Phys. 1974. V. 45. P. 3023—3032.
- [2] Miller G. L., Ramirez J. V., Robinson D. A. // J. Appl. Phys. 1975. V. 46. P. 2638—2644.
- [3] Crowell C. R., Alipanahi S. // Sol. St. Electron. 1981. V. 24. P. 25—36.
- [4] Weiss S., Kassing R. // Sol. St. Electron. 1988. V. 31. P. 1733—1742.
- [5] Воеводин В. В. // ЖВМ и ВФ. 1969. Т. 9. С. 673—675.
- [6] Тихонов А. Н., Арсенин В. Я. Методы решения некорректных задач. М., 1986. 298 с.
- [7] Губская В. И., Кучинский П. В., Ломако В. М. // ФТП. 1986. Т. 20. В. 6. С. 1055—1059.
- [8] Abdullin Kn. A., Mukashev B. N., Tamendarov M. F., Tashenov T. B. // Phys. Lett. A. 1990. V. 144. P. 198—200.
- [9] Чихрай Е. В. // ПТЭ. 1988. № 5. С. 184—186.

Получено 11.11.1990

Принято к печати 11.12.1990

ФТП, том 25, вып. 4, 1991

## СПЕКТРЫ ФОТОЭМИССИИ ИЗ МЕТАЛЛА В *p*-Ge ПРИ НИЗКИХ ТЕМПЕРАТУРАХ

Леднева Е. С.

Сведения о контактах металл—германий немногочисленны и в основном относятся к структурам на *n*-Ge [1]. Для *p*-Ge лишь в [2] приведены данные о высотах потенциальных барьеров структур с Au и Ni, но не указан метод их измерения; а в [3] исследованы вольт-амперные характеристики точечного контакта Ni—*p*-Ge.

В данной работе фотоэлектрическим методом исследованы свойства контактов металл—*p*-Ge для структур с различными металлами и в случае *p*-Ge с различными примесями в объеме. Фотоэлектрический метод выбран как наиболее прямой, точный и не требующий сложных математических вычислений. Измерения проводились для структур, сформированных вакуумным напылением Au на механически обработанную поверхность *p*-Ge. В качестве подложек использовался Ge, легированный Hg, Cd, Cu, Zn, Au. Толщина напыляемого металла составляла 10 и 270 нм. Измерения также были выполнены для контактов Ge : Hg с различными металлами (Au, Cu, Ta, Cr, Ni). Исследования проводились в охлаждаемой камере при  $T=9-11$  К. Освещение производилось со стороны металлической пленки структуры, так что изменение толщины металлической пленки меняло концентрацию свободных носителей в подложке исследуемой структуры.

В фотоэлектрическом методе используют представления Фаулера о фотоэмиссии из металла в вакуум и обычно считают, что спектр фотоэмиссии из металла в полупроводник в координатах  $\sqrt{R}$ ,  $h\nu$  ( $R$  — приведенная к одному кванту величина фототовета,  $h\nu$  — энергия квантов падающего излучения) описывается прямой линией, а ее экстраполяция к оси абсцисс дает высоту потенциального барьера контакта металл—полупроводник  $q\varphi_b$ . В наших условиях для спектров фотоэмиссии из металлов в *p*-Ge выявлен ряд особенностей: 1) увеличение толщины металлической пленки приводит к отклонению спектрального распределения фототовета от прямой линии; 2) в спектрах фотоэмиссии наблюдаются регулярные осцилляции с периодом следования  $A=0.037$  эВ. Наблюдавшиеся особенности спектров фотоэмиссии не позволяют путем экстраполяции точно определить высоту потенциальных барьеров контактов. По «красной границе» фототовета эту величину можно оценить как  $q\varphi_b < q\varphi_0$ , где  $q\varphi_0$  колеблется в зависимости от условий эксперимента в пределах 0.10—0.13 эВ.