

06;11

Визуализация ловушек в окисных полупроводниках с помощью термостимулированной электронной эмиссии

© С.Н. Нагорных, В.И. Павленков

Нижегородский государственный педагогический университет

E-mail: algoritm@sandy.ru

Арзамасский государственный педагогический институт им. А.П. Гайдара

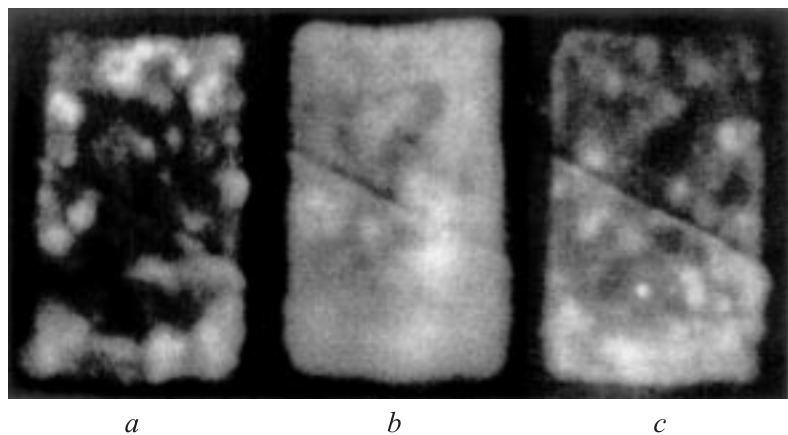
E-mail: agpi@nts.ru

Поступило в Редакцию 2 марта 2005 г.

Наблюдались флуктуации плотности заряженных точечных дефектов в поверхностном окисном слое железо-никелевого сплава при регистрации термостимулированной электронной эмиссии.

Известно, что в частично неупорядоченных полупроводниках существуют флуктуации плотности заряженных примесей, вызывающие искривление дна зоны проводимости, флуктуации энергии заряженных примесей и т.п. [1,2].

Визуализировать подобные флуктуации на основе регистрации прыжковой проводимости затруднительно, поскольку в этом случае существенными оказываются объемные свойства полупроводника, а роль контактов не изучена. С помощью термоэлектронной эмиссии визуализированы различные поверхности [3], но стационарный ток и температуры при этом столь велики, что эмиттер приобретает равновесную электронную и атомную структуру. Термостимулированная электронная эмиссия (ТСЭЭ) применяется для исследования материалов при меньших температурах и малых токах, что позволяет, например, исследовать кинетику плотности дефектов (дивакансий) металла, созданных ионной бомбардировкой на стороне, противоположной измерению ТСЭЭ [4], или модуляцию электрическим полем энергии примесей (дефектов) [5]. Можно ожидать, что ТСЭЭ окажется чувствительной и к флуктуациям дефектов — электронных ловушек — в приповерхностных слоях твердых тел. Цель настоящей работы — наблюдение подобных флуктуаций



Изменение распределения плотности эмиссионного тока по поверхности образца ФНС-5 в зависимости от температуры: *a* — 230°C, *b* — 270°C, *c* — 340°C. Скорость термостимуляции 0.45 K/s. Получено с помощью микроканальных пластин. Размер изображения 8 × 11 mm. Разрешающая способность устройства визуализации 2 lp/mm.

при регистрации ТСЭЭ в вакууме 10^4 Pa с помощью электронного микроканального умножителя и люминесцентного экрана [6] с окисленных металлических поверхностей.

В опытах использовался сплав (ФНС-5), получаемый спеканием железо-никелевого порошка для создания фильтров. Его окисный слой представляет собой частично неупорядоченный слаболегированный компенсированный полупроводник, имеющий высокую концентрацию точечных дефектов: кислородных вакансий (КВ) (доноров) и междоузлий металла (акцепторов) на поверхности металлических частиц, которые удерживаются возле друг друга диффузионными мостиками.

В процессе термостимуляции наблюдались следующие изменения изображения поверхности образца на люминесцентном экране: 1) $T < 200^\circ\text{C}$ — отсутствие свечения; 2) $T = 200 \div 220^\circ\text{C}$ — отдельные вспышки—сцинтилляции на экране; 3) $T = 230 \div 300^\circ\text{C}$ — появление светящихся пятен (см. рисунок, *a*); 4) $T = 300 \div 330^\circ\text{C}$ — свечение большей части изображения поверхности (см. рисунок, *b*); 5) $T > 330^\circ\text{C}$ — затухание свечения (см. рисунок, *c*). Изменение вида распределения интенсивности электронной эмиссии по поверхности

образца в квазистационарном случае можно объяснить изменением распределения плотности свободных электронов в окисном слое под действием внешней среды с белым шумом [2]. В этом случае под внешней средой следует понимать термоактивационный диффузионный процесс изменения площадей мостиков между теми частицами сплава, для которых велика интенсивность диффузионных скачков, а также вязкость.

Обнаруженное изменение распределения плотности эмиссионного тока по поверхности образца можно интерпретировать следующим образом. 1. Термоионизация КВ не происходит, плотность свободных электронов в окисном слое равна нулю $n = 0$. 2. Активизирован процесс термоионизации КВ, однако из-за невысокой температуры интенсивность его невелика. Значение n флуктуирует вблизи нуля, причем нуль является ее наиболее вероятным значением. 3. На отдельных участках поверхности наиболее вероятное значение n становится больше нуля, происходит накопление свободных электронов в местах понижения дна зоны проводимости (ЗП). 4. Эмиссия происходит со всех участков поверхности, а не только из областей с повышенной плотностью КВ. 5. Истощение заполненных КВ ведет к уменьшению площади эмитирующих участков поверхности и к условию $n \approx 0$. Вследствие изменения рельефа дна ЗП в процессе термостимуляции, изменяется и расположение пятен на изображении поверхности и их размер.

Приближение сильнокомпенсированного слаболегированного полупроводника [1] учитывает наличие крупномасштабных флуктуаций плотности точечных заряженных дефектов, взаимодействующих между собой по закону Кулона и изменяющих положение уровня Ферми относительно дна ЗП. При этом величина радиуса экранирования связывается с величиной суммарной концентрации примесей (акцепторов и доноров) $N_t = N_A + N_D$ и степенью компенсации полупроводника $K = N_A/N_D$, причем $K \approx 1$. Участием свободных электронов в экранировании пренебрегается. В таком случае средняя величина флуктуаций потенциальной энергии электрона в поле заряженных дефектов равна

$$\gamma(r) = e^2 N_t^{2/3} / \kappa \nu^{1/3} \quad (1)$$

(e — заряд электрона, κ — диэлектрическая проницаемость среды, ν — средняя концентрация нейтральных доноров) и соответствует радиусу экранирования

$$r = 2^{2/3} N_t^{-1/3} / (1 - K)^{2/3}. \quad (2)$$

Такого же размера должны быть и квазистационарные флуктуации плотности эмиссионного тока $J \sim \nu$ из окисла, поскольку скопление в некоторой области полупроводника положительно заряженных примесей вызывает переход в эту область электронов с локализацией их на КВ. Следовательно, радиус экранирования может соответствовать радиусу участка поверхности с повышенной активностью ТСЭЭ. Флуктуации ν подобны движению с трением частицы (флуктуона) по координате ν в случайном потенциале. Рассмотрение в рамках уравнений Блохинцева предполагает существование и неподвижных флуктуонов [7], которые, однако, в данной работе не рассматривались.

Для экспериментально полученной температурной зависимости тока ТСЭЭ рассчитаны некоторые параметры поверхностного окисла железно-никелевого сплава [8]: $\varepsilon = 1.19$ eV, $\chi = 1.15$ eV, плотность КВ на поверхности окисла — $3 \cdot 10^{20} \text{ m}^{-3}$, плотность нейтральных КВ при температуре начала стимуляции — 10^{16} m^{-3} , степень компенсации полупроводника — 0.99997. На их основании, по формулам (1) и (2), получены средние значения величины радиуса экранирования и флуктуаций дна ЗП: $2 \cdot 10^{-3} \text{ m}$ и 0.05 eV соответственно. Средние размеры флуктуаций ТСЭЭ на рис. 1, *c* соответствуют полученной оценке радиуса экранирования. Изменение средней величины ε на 0.05 eV приводит, согласно оценке [8], к смещению температурного максимума эмиссионного тока примерно на 30°C , что проявляется в изменении вида распределения эмиссионно-активных участков поверхности с ростом температуры.

Функция распределения по длине образца вероятности существования эмитирующих участков (светлых пятен), полученная для рис. 1, соответствует решению стационарного уравнения Фоккера–Планка–Колмогорова для кинетики ν (бифуркация Ферхюльста–Арнольда) [2] и имеем вид

$$p_s(x) = N_0 \cdot x^{2\lambda/\sigma^2 - 1} \cdot \exp(-2x/\sigma^2). \quad (3)$$

Здесь σ^2 — интенсивность внешнего шума, λ — детерминированный параметр, N_0 — нормировочный множитель. В зависимости от температуры последовательно реализовались три случая: $\lambda < 0$, $0 \leq \lambda < \sigma^2/2$ (рис. 1, *a*) и $\lambda > \sigma^2/2$ (рис. 1, *b*), которым соответствовали три типа распределения.

Аналогично работе [1] неупорядоченность КВ соответствует пуассоновскому распределению, поэтому можно утверждать, что полученный по (2) типичный размер радиуса экранирования соответствует

наблюдаемым в эксперименте размерам эмиссионно-активных участков поверхности образца и визуализация приповерхностных флуктуаций плотности нейтральных дефектов окисленного образца ФНС-5 с помощью ТСЭЭ возможна.

Список литературы

- [1] Шкловский Б.И., Эфрос А.Л. Электронные свойства легированных полупроводников. М.: Наука, 1979. С. 416.
- [2] Horsthemke W., Malek Mansour M. // Zs. Phys. 1976. V. B24. P. 397–402.
- [3] Дружинин А.В. // Изв. АН СССР. Сер. Физ. 1961. Т. 25. С. 730–737.
- [4] Пантелеев В.А., Еришов С.Н., Черняховский В.В. и др. // ПЖЭТФ. 1976. Т. 23. В. 12. С. 688–691.
- [5] Brunsmann U., Scharmann I. // 4th International Symposium on Exoelectron Emission and Dosimetry. Liblice, 1973. P. 137–141.
- [6] Лапин Н.И., Нагорных С.Н., Павленков В.И. и др. // XLII Международная конференция „Актуальные проблемы прочности“. Калуга, 2004. С. 105.
- [7] Кривоглаз М.А. // УФН. 1973. Т. 111. В. 4. С. 617–654.
- [8] Нагорных С.Н., Павленков В.И. // Письма в ЖТФ. 2005. Т. 31. В. 4. С. 1–5.