

- [8] Алукер А. Э., Дейч Р. Г., Думбадзе Г. С. // Изв. АН Латв.ССР, сер. физ. и техн. наук. 1987. № 4. С. 17—20.
- [9] Алукер А. Э., Дейч Р. Г., Думбадзе Г. С. // Письма в ЖТФ. 1988. Т. 14. № 23. С. 2132—2136.
- [10] Куусман И. Л., Лийдья Г. Г., Лущик Ч. Б. // Тр. ИФ АН ЭССР. 1976. № 46. С. 5—80.
- [11] Itoh M., Hashimoto S., Ohno N. // J. Phys. Soc. Jap. 1990. V. 59. N 5. P. 1881—1889.
- [12] Itoh M., Ohno N., Hashimoto S. // J. Phys. Soc. Jap. 1990. V. 59. N 2. P. 765—772.

Институт физики АН Латвийской ССР
Саласпилс

Поступило в Редакцию
11 ноября 1990 г.

УДК 621.383

© Физика твердого тела, том 33, № 5, 1991
Solid State Physics, vol. 33, N 5, 1991

ТОКОВЫЙ ШУМ ГРАНИЦ ЗЕРЕН В ПОЛИКРИСТАЛЛИЧЕСКОМ КРЕМНИИ

*Н. Н. Ткаченко, Г. П. Колomoец, А. К. Федотов,
Ю. М. Ильяшук, И. Б. Снапиро*

Исследование физических процессов, протекающих на границах зерен (ГЗ) поликристаллического кремния, привлекает все большее внимание своеобразием физической ситуации, возникающей на ГЗ: наличием потенциальных барьеров типа барьеров Шоттки или гетеропереходов, существованием спектра пограничных состояний (ПС), присутствием деформационных и сегрегационных эффектов. Однако в отечественной литературе практически отсутствуют сведения об исследованиях флуктуационных характеристик ГЗ в кремнии, а в зарубежной — появилось лишь несколько работ, посвященных этой проблеме [1, 2]. Данная работа посвящена изучению взаимосвязи электрической активности ГЗ разных типов и их флуктуационных характеристик.

Исследование токового шума S_i проводили на образцах профилированного кремния, изготовленных по методу Степанова и содержащих единичные ГЗ различного структурного совершенства и рекомбинационной активности. Образцы были легированы бором и имели концентрации дырок при комнатной температуре порядка 10^{16} см⁻³. Измерение электрического шума активных и неактивных ГЗ проводили при ориентации тока перпендикулярно плоскости ГЗ. Для сравнения были проведены измерения для образца, вырезанного из участка, где ГЗ отсутствовали. Оценка активности ГЗ проводилась по их влиянию на перенос основных носителей заряда через плоскость ГЗ и определялась наличием или отсутствием потенциального барьера ϕ_b на ГЗ, высота которого измерялась по температурным зависимостям удельного сопротивления. Величина ϕ_b коррелировала с данными рентгеноструктурного анализа ГЗ и была равна нулю для ГЗ с малыми углами разориентировки — неактивные ГЗ [3]. Флуктуации электрического напряжения S_e измеряли прямым методом в диапазоне частот 0.02—100 кГц на потенциальных зондах, расположенных вблизи ГЗ; ток величиной $3 \cdot 10^{-5}$ — $2 \cdot 10^{-3}$ А пропускали через токовые контакты (рис. 1, а).

Вольт-амперные характеристики (ВАХ) активных ГЗ при $T=300$ К в условиях проведенных экспериментов по исследованию шума демонстрировали слабую нелинейность при $I > 10^{-4}$ А, однако четкая экспоненциальная зависимость ВАХ обнаружена не была. Это связано, возможно, со специфическим механизмом прохождения тока через неоднородный потенциальный барьер на ГЗ и (или) шунтированием этого барьера

некими низкоомными областями. Существование подобных особенностей доказано измерением ВАХ ГЗ при низких температурах [3]. В отличие от ВАХ величина электрического шума имела довольно сильное различие в образцах с ГЗ различной активности.

На рис. 1, б приведены для сравнения спектры токового шума $S_i = S_p/Z^2$ (где Z — дифференциальное сопротивление образца), измеренные при пропускании тока $I = 2 \cdot 10^{-3}$ А. Минимальный уровень шума характерен для образца, не содержащего ГЗ (кривая 1). Форма спектра такого шума в области частот $f = 10^2 - 5 \cdot 10^3$ Гц характерна для фликкер-шума. В области $f < 100$ Гц наблюдается тенденция формирования частотно-независимой «полки», которую можно объяснить предположением о существовании в зерне локализованных центров, модулирующих число носителей заряда. Подтверждением этому предположению является квадратичная низкочастотная токовая зависимость шума [4]. Расположение

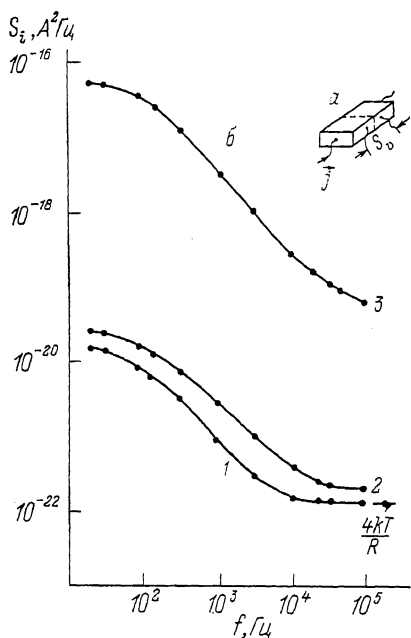


Рис. 1. Конфигурация образцов (а) и спектры шума границ зерен (б). 1 — зерно, 2 — неактивная ГЗ, 3 — активная ГЗ.

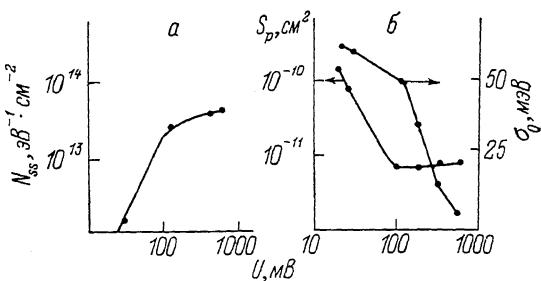


Рис. 2. Зависимости плотности пограничных состояний N_{ss} (а), сечения захвата S_p и стандартного отклонения распределения потенциала σ_0 на активной ГЗ (б) от прикладываемого напряжения.

таких центров в объеме зерна было выявлено по отсутствию изменений величины и формы шума при изменении условий на поверхности. Природа глубоких ловушек такого типа, возможно, связана с технологией изготовления образцов. Известно, что наличие графитового формообразователя в расплаве, высокие скорости выращивания вызывают повышенное содержание примесей и структурных дефектов в материале [3]. При частотах $f > 10$ кГц виден «белый» шум, связанный с тепловыми флуктуациями сопротивления зерна ($4kT/R$).

Максимальную шумовую активность проявляли ГЗ общего типа с относительно большой разориентировкой соседних зерен (кривая 3). Спектр токового шума имел $1/f^{\gamma}$ -форму, где $\gamma = 1 - 1.2$ при $f > 120$ Гц, в низкочастотной области наблюдались частотно-независимые участки. Высокая шумовая активность таких ГЗ может быть объяснена с помощью модели «транзистора на ловушках», в которой ток j через ГЗ ассоциируется с током коллектора транзистора, управляемым током базы j_{τ} -током, связанным с захватом-эмиссией носителей на ловушки в области ГЗ [5]. Изменение j_{τ} приводит к модуляции высоты потенциального барьера ϕ_b , обусловленного захватом носителей на ГЗ, а модуляция ϕ_b приводит к экспоненциально усиленным флуктуациям тока через образец. Форма спектра шумового сигнала для активных ГЗ оказалась типичной для шума ГЗ, описываемого вышеприведенной моделью с учетом неоднородности потенциального барьера вдоль ГЗ при распределении высот ϕ_b , подчиняю-

щимся гауссовскому закону. Согласно этой модели, спектральная плотность флуктуаций напряжения на ГЗ описывается формулой

$$S_v(f) \cdot 2\pi f = \frac{2kTq^2 N_{ss}}{C_R^2 (2\pi\sigma_s^2)^{1/2} \Omega A} \int_{-\infty}^{\infty} \ln[1 + \Omega^2 \exp(2U_s)] \exp\left(-\frac{U_s^2}{2\sigma_s^2} - U_s\right) dU_s, \quad (1)$$

где N_{ss} — плотность ПС ($\text{см}^{-2} \cdot \text{эВ}^{-1}$); C_R — емкость обратной смещенной части ГЗ ($\Phi \text{ см}^{-2}$); σ_s — стандартное отклонение распределения потенциала вдоль ГЗ; $\Omega = 2\pi f\tau$ — параметр; τ — средняя характеристическая постоянная времени, связанная с захватом носителей на ловушки в области ГЗ (с); $U_s = (q/kT)(\varphi_b - \bar{\varphi}_b)$ — параметр; φ_b — высота потенциального барьера (В); $\bar{\varphi}_b$ — средняя по ГЗ высота потенциального барьера (В); A — площадь ГЗ (см^2).

Из экспериментальных спектров флуктуаций напряжения на ГЗ с помощью вышеописанной модели получены значения таких параметров ГЗ, как плотности ПС N_{ss} , сечения захвата ПС S_p и стандартного отклонения распределения потенциала $\sigma_0 = \frac{kT}{q} \sigma_s$, а также их зависимость от прикладываемого напряжения (рис. 2).

Используемая при расчете экспериментальная кривая $S_v(f) \cdot 2\pi f$ для неактивной ГЗ не имела характерного максимума, позволяющего выполнить расчет. В то же время сравнение величин $S_v(f) \cdot 2\pi f$ для активной и неактивной ГЗ показывает, что плотность ПС для неактивной ГЗ может быть порядка $10^8 - 10^{10} \text{ см}^{-2} \cdot \text{эВ}^{-1}$. Однако отсутствие экстремума на кривой наводит на мысль о том, что в случае неактивной ГЗ механизм генерации шума имеет другую природу. Уменьшение шумовой активности в случае неактивной ГЗ можно объяснить нарушением непрерывности потенциального барьера вдоль ГЗ. Локальные ОПЗ теперь играют роль ловушек для носителей заряда, а большая часть тока протекает в местах, свободных от ОПЗ.

Нужно отметить то обстоятельство, что шумовая методика измерений позволила увидеть отличие неактивной ГЗ от зерна, в то время как другими методами (ЕВИС, ЛВИС, термоактивационным) это различие обнаружено не было [3]. Кроме того, обнаружено превышение ВЧ шумом ГЗ уровня теплового шума сопротивления ГЗ (рис. 1, б). И если для активной ГЗ не наблюдается четкий частотно-независимый участок в высокочастотной области, то для неактивной ГЗ этот участок виден, и величина шума в этой области на 40—50 % превышает тепловой шум. Наличие избыточного белого шума наблюдали также в полупроводниковых приборах с поликристаллическим кремнием в активных областях [6]. Таким образом, данная работа позволила получить дополнительное свидетельство о возможности генерации такого шума в области ГЗ.

Список литературы

- [1] Madenach A. J., Werner J. // Phys. Rev. Lett. 1985. V. 55. N 11. P. 1212—1215.
- [2] Madenach A. J., Werner J., Stützler F. J. // Proc. XVIII IEEE Photovoltaic Spec. Conf. 1985. P. 1088—1093.
- [3] Горелик С. С., Евтодий Б. Н., Ильяшук Ю. М., Федотов А. К., Кац Е. А., Поляк Л. Е., Фионова Л. К. // Препринт. Черноголовка, 1989.
- [4] Букингом М. Шумы в электронных приборах и системах: Пер. с англ. М., 1986. 398 с.
- [5] Поликристаллические полупроводники. Физические свойства и применения / Под ред. Г. Харбеке. М., 1989. 344 с.
- [6] Ткаченко Н. Н., Назаренко В. Н. // Компоненты и материалы электронной техники. Киев, 1989. С. 64—65.

Индустриальный институт
Запорожье

Поступило в Редакцию
25 сентября 1990 г.
В окончательной редакции
3 декабря 1990 г.