

01;06.2;12

©1993

ИССЛЕДОВАНИЕ ШУМА $1/f$ В $6H-SiC$ *М.Е. Левинштейн, Дж. Палмор,* С.Л. Румянцев*

Исследование низкочастотного шума в полупроводниках позволяет судить о степени структурного совершенства материала [1], дает возможность в ряде случаев предсказывать долговременную стабильность и надежность полупроводниковых приборов [2], предоставляет дополнительные возможности для определения параметров примесных центров [3], а для СВЧ приборов зачастую определяет возможность использования прибора в связных системах. Весьма часто низкочастотный шум имеет форму шума $1/f$. В этом случае установление природы шума представляет, как правило, значительный физический интерес.

Для каждого из основных материалов современной полупроводниковой электроники, Si и GaAs, опубликованы десятки работ по исследованию низкочастотного шума (см., например, обзор [4]).

Благодаря успехам технологии последних лет SiC становится основным материалом высокотемпературной полупроводниковой электроники. На основе карбида кремния созданы эффективные диодные структуры [5], транзисторы [6] и динисторы [7]. Тем не менее, данные о характере низкочастотного шума в SiC в литературе практически отсутствуют. В единственной известной нам работе [8] низкочастотный шум изучался в слое сильно компенсированного α -SiC в условиях тока, ограниченного пространственным зарядом. Наблюдаемые результаты интерпретированы как результат суперпозиции 3–5 Лоренцианов. Эквивалентное значение параметра Хоуге α равнялось ~ 0.6 . Эта величина на много порядков превосходит значения, обычно наблюдаемые для объемного Si ($\alpha \sim 10^{-4} - 10^{-7}$) и GaAs ($\alpha \sim 10^{-3} - 10^{-5}$).

В настоящей работе исследование низкочастотного шума в $6H-SiC$ проводилось с использованием полевых транзисторов с затвором в виде p-n перехода, изготовленных фирмой Cree Res., Inc. Параметры транзисторов подробно описаны в работе [9]. Использование транзисторных структур удобно в нескольких отношениях. Во-первых, большое

* Cree Research, Inc., 2810 Meridian Parkway, Durham, N.C. 27713, USA.

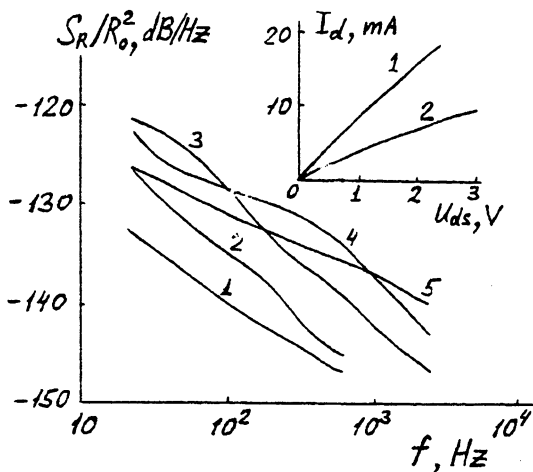


Рис. 1. Частотные зависимости спектральной плотности флуктуаций сопротивления канала S_R/R_0^2 . T (K): 1 — 293, 2 — 390, 3 — 480, 4 — 528, 5 — 562. Напряжение исток-сток $U_{ds} = 1.5$ В (омический режим), $U_g = 0$.

На вставке — зависимость $I_d(U_{ds})$ в области малых напряжений исток-сток. T (K): 1 — 293, 2 — 603. $U_g = 0$.

значение отношения длины стокового и истокового электродов к толщине канала обуславливает формирование естественной “гантели” с большим отношением размера омических электродов к размеру активной области. Такая форма образца обеспечивает уменьшение вклада контактов в сопротивление и шум канала, что особенно важно для карбида кремния. Во-вторых, благодаря малой толщине канала ($\sim 0.1-0.2$ мкм) полное число носителей N в образце мало, что позволяет использовать для измерения шумов стандартную аппаратуру даже при высоком уровне легирования $n_0 \sim (1-2) \cdot 10^{17} \text{ см}^{-3}$. Наконец, использование структур, изготавливаемых по отработанной технологии, обеспечивает высокую воспроизводимость результатов. С другой стороны, многолетний опыт исследования GaAs полевых транзисторов показывает, что измерения при малом напряжении исток-сток U_{ds} (в омической области) при нулевых (или малых) обратных смещениях на затворе позволяет измерять объемные свойства материала канала (см., например, [10]).

На рис. 1 показаны частотные зависимости спектральной плотности флуктуаций сопротивления канала S_R/R_0^2 . Видно, что при комнатной температуре (кривая 1) зависимость $S_R(f)$ в области частот 20 Гц–2.5 кГц имеет вид $1/f$. Расчет

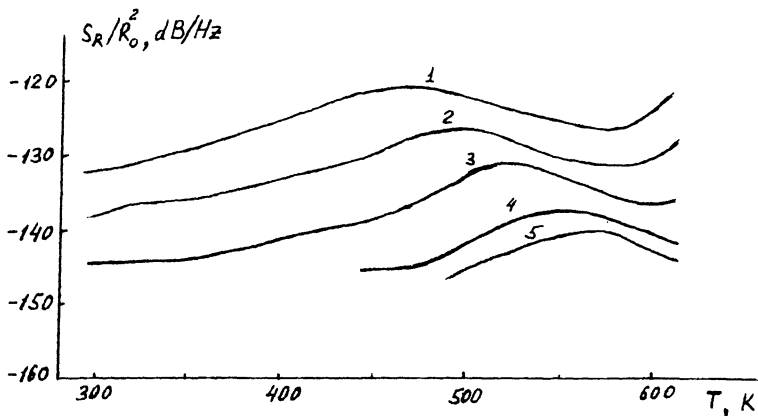


Рис. 2. Температурные зависимости спектральной плотности флуктуаций сопротивления S_R/R_0^2 , f (Гц): 1 — 20, 2 — 80, 3 — 320, 4 — 1280, 5 — 2560. Омический режим. $U_g = 0$.

постоянной Хоуге α , исходя из полного числа носителей в канале $N \cong 5 \cdot 10^7$ электронов, дает величину $\alpha \cong 5 \cdot 10^{-5}$. В соответствии с критериями, установленными для Si [11] и GaAs [1], столь малое значение α свидетельствует о весьма высоком уровне структурного совершенства материала, вполне сравнимом со структурным совершенством лучших эпитаксиальных GaAs пленок в каналах полевых транзисторов.

При расчете величины N ширина канала W считалась равной 1 мм, длина канала $L = 5$ мкм. Геометрическая толщина канала h равнялась ~ 0.29 мкм. Эффективная толщина канала h° принималась равной 0.1 мкм. Как показывают вольт-емкостные измерения при обратном напряжении и вольт-амперные характеристики при прямом смещении на затворе, величина встроенного потенциала затвора $U_{g0} = 2.4$ В. Таким образом, ширина области объемного заряда со стороны р-п перехода при $U_g = 0$ составляет ~ 0.15 мкм. Если принять, что ширина области объемного заряда со стороны, противоположной затвору, составляет ~ 0.05 мкм, то величина $h^\circ \approx 0.1$ мкм. Оцененная таким образом толщина канала хорошо согласуется с измеренной величиной напряжения перекрытия структур $U_{gp} = -5$ В.

При измерениях частотной зависимости $S_r(f)$ в достаточно широком диапазоне температур (рис. 1) видно, что как и в других полупроводниковых материалах, спектральная плотность флуктуаций сопротивления в SiC представляет собой суперпозицию шума $1/f$ и отдельных Лоренцианов.

На рис. 2 показаны температурные зависимости спектральной плотности флуктуаций сопротивления для различных частот анализа f . На кривых $S_R(T)$ отчетливо виден максимум, монотонно смещающийся по мере увеличения частоты f от $T = 470$ К для $f = 20$ Гц до $T = 570$ К для $f = 2.5$ кГц. Обработка экспериментальных кривых стандартным для шумовой спектроскопии методом "наилучшей подгонки" [3] позволяет заключить, что наблюдающийся максимум связан с наличием в запрещенной зоне уровня с глубиной залегания $E_t \sim 0.18$ эВ ниже края зоны проводимости и концентрацией $N_t \sim 5 \cdot 10^{15}$ см⁻³. Сечение захвата электронов для этого уровня σ_n составляет $\sigma_n \sim 2.5 \cdot 10^{-23}$ см² при $T = 470$ К и экспоненциально растет с увеличением температуры. В исследованном диапазоне температур зависимость $\sigma_n(T)$ хорошо описывается выражением

$$\sigma_n = \sigma_0 \exp[-\Delta E_{act}/KT], \quad (1)$$

где $\sigma_0 = 10^{-14}$ см², $\Delta E_{act} = 0.8$ эВ. Хорошо известно, что такого рода зависимости $\sigma(T)$ характерны для процессов многофонового захвата (см., например, [12]). Заметим также, что быстрый рост сечения захвата с температурой характерен U для уровней, обнаруживаемых методом шумовой спектроскопии в GaAs (см. соответствующие ссылки в работе [1]).

Авторы искренне признательны М.И. Дьяконову и В.И. Козубу за прочтение работы и ценные замечания.

Список литературы

- [1] Дьяконова Н.В., Левинштейн М.Е., Румянцев С.Л. // ФТП. 1991. Т. 25. В. 2. С. 355-358.
- [2] Cottle J.G., Klonaris N.S., Bordelon M. // IEEE Electron Device Lett. 1990. V. 11. N 11. P. 523-525.
- [3] Scholz F., Hwang J.M., Schroeder D.K. // Solid State Electron. 1988. V. 31. N 2. P. 205-217.
- [4] Дьяконова Н.В., Левинштейн М.Е., Румянцев С.Л. // ФТП. 1991. Т. 25. В. 12. С. 2065-2104.
- [5] Anikin M.M., Ivanov P.A., Lebedev A.A., Pytko S.N., Strel'chuk A.M., Syrkin A.L. in book "Semiconductor Interfaces and Microstructures" ed. by Z.C.Feng, World Sci. NY.-London-Syngapour, 1992. P. 280.
- [6] Аникин М.М., Иванов П.А., Сыркин А.Л., Царенков Б.В. // Письма в ЖТФ. 1989. Т. 15. № 16. С. 36-42.
- [7] Dmitriev V.A., Levinshtein M.E., Vainshtein S.N., Chelnokov V.E. // Electron. Lett. 1988. V. 24. N 16. P. 1031-1033.
- [8] Tehrani S., Hench L.L., Van Vliet C.M., Bosman G. // J. Appl. Phys. 1985. V. 58. N 4. P. 1571-1577.
- [9] Palmour John W., Kong H.S., Waltz D.G., Edmond J.A., Calvin C.H., jr. // Proc. of the First Intern. Temper. Electr. Conf. Albuquerque, KM, USA, 1991. P. 511-518.

- [10] *Abdala M.A., Johnes B.K.* // *Solid State Electron.* 1992. V. 35. N 12. P. 1713-1719.
- [11] *Дьяконова Н.В., Левинштейн М.Е., Румянцев С.Л.* // *ФТП.* 1990. Т. 24. В. 9. С. 1531-1538.
- [12] *Abakumov V.N., Perel V.I., Vassievich I.N.* *Nonradiative recombination in Semiconductors. Modern problems in condensed matter sciences.* V. 33. North-Holland, Amsterdam-Oxford-N.Y.-Tokyo, 1991. 320 p.

Поступило в Редакцию
24 марта 1993 г.
