

# Низкочастотный шум в эпитаксиальных слоях нитрида галлия с разной степенью упорядоченности мозаичной структуры

© Н.М. Шмидт, М.Е. Левинштейн<sup>¶</sup>, В.В. Лундин, А.И. Бесюлькин, П.С. Копьев,  
S.L. Romyantsev\*, N. Pala\*, M.S. Shur\*

Физико-технический институт им. А.Ф. Иоффе Российской академии наук,  
194021 Санкт-Петербург, Россия

\* Department of Electrical, Computer, and Systems Engineering,  
CII 9017, Rensselaer Polytechnic Institute, Troy NY 12180-3590, USA

(Получена 30 января 2004 г. Принята к печати 26 февраля 2004 г.)

Впервые исследована корреляция между уровнем шума  $1/f$  и степенью упорядоченности мозаичной структуры в эпитаксиальных слоях нитрида галлия. Образцы с уровнем легирования  $N_d - N_a \approx 8 \cdot 10^{16} \text{ см}^{-3}$  и относительно высоким уровнем упорядоченности характеризовались величиной параметра Хоуге  $\alpha \approx 1.5 \cdot 10^{-3}$ . Полученное значение является рекордно низким для тонких эпитаксиальных пленок GaN. Для образцов с  $N_d - N_a \approx 1.1 \cdot 10^{18} \text{ см}^{-3}$  и низким уровнем упорядоченности параметр Хоуге был существенно выше ( $\alpha \approx 5.5 \cdot 10^{-3}$ ), несмотря на то что при равном уровне упорядоченности величина  $\alpha$ , как правило, уменьшается с увеличением уровня легирования. Таким образом, степень упорядоченности мозаичной структуры сказывается не только на оптических и электрических, но и на флуктуационных характеристиках эпитаксиальных слоев GaN.

Приборы на основе нитрида галлия (GaN) в настоящее время рассматриваются как одни из самых перспективных в таких областях электроники, как светоизлучающие приборы коротковолновой области спектра, „солнечно слепые“ ультрафиолетовые фотоприемники, мощные быстродействующие транзисторы и т.д. [1–5].

Характерной особенностью этих материалов является система протяженных дефектов, включающая высокую плотность дислокаций и мозаичную (колончатую, доменную) структуру [6]. Ранее было показано, что многообразие структурных особенностей III-нитридов можно охарактеризовать количественно, используя такие системные параметры, как степень упорядоченности мозаичной структуры  $\Delta$ , степень нарушения общей и локальной симметрии, а также уровень самоорганизации системы протяженных дефектов [7]. При этом, чем меньше значения  $\Delta$ , тем лучше упорядочена мозаичная структура.

Сравнительные исследования структурных свойств эпитаксиальных слоев с разными значениями  $\Delta$  показали, что для слоев с хорошо упорядоченной мозаичной структурой ( $\Delta < 0.340$ ) наблюдается преимущественно когерентное согласование доменов мозаичной структуры с образованием дилатационных границ. Для эпитаксиальных слоев с плохо упорядоченной мозаичной структурой ( $\Delta > 0.350$ ) характерно преимущественное формирование дислокационных стенок на границах доменов. При промежуточных значениях  $\Delta$  оба вида границ сосуществуют в разных концентрациях [8].

Оптические и электрические свойства слоев, а также механизмы переноса носителей заряда существенно отличаются в слоях с разными значениями  $\Delta$  [9]. Для слоев с хорошо упорядоченной мозаичной структурой характерна классическая температурная зависимость проводимости: в области низких температур  $T$  проводимость

с увеличением  $T$  растет, достигает максимума, а затем падает с дальнейшим ростом  $T$  вследствие фононного рассеяния. Для слоев с плохо упорядоченной мозаичной структурой температурная зависимость проводимости сильно отличается от этой классической формы и напоминает соответствующие зависимости для низкоразмерных структур [10].

Хорошо известно, что шум  $1/f$  является одним из наиболее чувствительных индикаторов структурной неупорядоченности полупроводников (см., например, [11]). Однако, насколько нам известно, никаких попыток установить корреляцию между степенью упорядоченности мозаичной структуры GaN и уровнем шума  $1/f$  до сих пор предпринято не было.

В данной работе впервые исследована корреляция между уровнем шума  $1/f$  и степенью упорядоченности мозаичной структуры в эпитаксиальных слоях нитрида галлия.

## 1. Условия эксперимента

Исследования проводились на эпитаксиальных слоях нитрида галлия  $n$ -типа проводимости, выращенных на сапфировых подложках (0001) методом эпитаксии из металлоорганических соединений (MOCVD). Слои отличались между собой условиями формирования буферного слоя, степенью упорядоченности мозаичной структуры  $\Delta$ , значениями подвижности  $\mu$ , и концентрации электронов  $n$ , и характеризовались следующими параметрами.

Слой А-598 обладал высокой степенью структурной упорядоченности ( $\Delta = 0.320$ ). При комнатной температуре концентрация электронов равнялась  $n = N_d - N_a \approx 8 \cdot 10^{16} \text{ см}^{-3}$ , холловская подвижность  $\mu = 600 \text{ см}^2/(\text{В} \cdot \text{с})$ . Толщина слоя  $t = 4 \text{ мкм}$ .

<sup>¶</sup> E-mail: melev@nimis.ioffe.rssi.ru

Слой В-1261 характеризовался значением  $\Delta = 0.350$ . При комнатной температуре концентрация электронов равнялась  $n = N_d - N_a \approx 10^{18} \text{ см}^{-3}$ , подвижность  $\mu = 200 \text{ см}^2/(\text{В} \cdot \text{с})$ . Толщина слоя  $t = 3 \text{ мкм}$ .

Степень упорядоченности мозаичной структуры определялась путем обработки методами мультифрактального анализа данных, полученных при исследовании поверхностей этих слоев с помощью атомно-силовой микроскопии по методике, описанной в работе [7].

На каждом из слоев создавались омические контакты в виде параллельных полосок длиной  $W = 240 \text{ мкм}$  с различным расстоянием между полосками  $L$ :  $5 < L < 41 \text{ мкм}$ . Низкочастотный шум измерялся в линейном режиме (при малом напряжении, приложенном к исследуемым образцам) в диапазоне частот от 1 Гц до 10 кГц с использованием вольфрамовых зондов с диаметром острия  $\sim 10 \text{ мкм}$ . Специальная процедура „притирки“ зондов к поверхности контактов обеспечивала малое переходное сопротивление между зондом и металлическими контактами.

## 2. Результаты эксперимента и их обсуждение

Для каждого из слоев А и В исследовалось несколько десятков образцов с различными значениями  $L$ . Для всех образцов вольт-амперные характеристики в исследованном диапазоне токов ( $\sim 2 \cdot 10^{-3} - 0.2 \text{ А}$ ) были линейными. Измерения на образцах с различными расстояниями  $L$  позволили определить величину контактного сопротивления и независимо от данных холловских измерений установить значение проводимости слоев  $\sigma$ . В качестве примера на рис. 1 показаны результаты соответствующих измерений для пластины А.

Зависимость  $R(L)$ , продолженная до значения  $L = 0$ , определяет значение удвоенного контактного сопротивления  $2R_c = 34 \text{ Ом}$ . Измеренное значение  $R_c$  соответствует удельному контактному сопротивлению  $r_c \approx 4 \text{ Ом} \cdot \text{мм}$ , что при концентрации электронов  $n \approx 8 \cdot 10^{16} \text{ см}^{-3}$  и планарных контактах представляется вполне разумной величиной. Аналогичные измерения для пластины В дают значение  $2R_c = 8.4 \text{ Ом}$

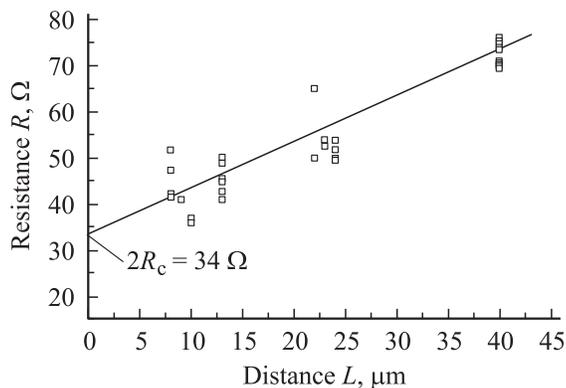


Рис. 1. Зависимость сопротивления образцов В от расстояния между контактами  $L$  (для пластины А).

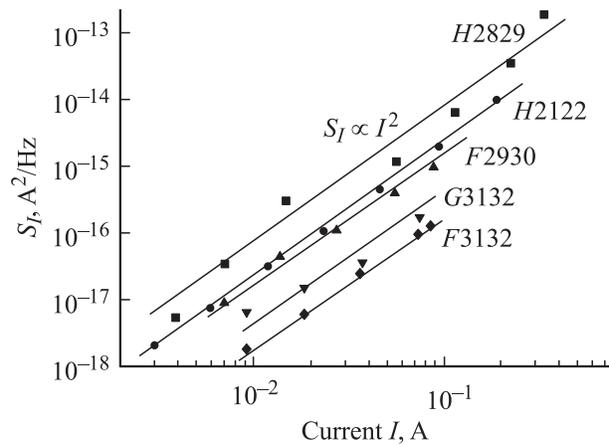


Рис. 2. Зависимости спектральной плотности шума  $S_I$  от тока  $I$  для нескольких образцов из пластины В. Частота анализа  $f = 6 \text{ Гц}$ . Сплошные линии соответствуют соотношению  $S_I \propto I^2$ .

( $r_c \approx 1 \text{ Ом} \cdot \text{мм}$ ). Меньшее значение  $r_c$ , естественно, объясняется большей величиной  $n$  в пластине В ( $n \approx 10^{18} \text{ см}^{-3}$ ) [12].

По наклону зависимости  $R(L)$ , как известно, можно определить усредненное значение удельной проводимости нитрида галлия  $\sigma$ . Значение  $\sigma$ , определенное из рис. 1,

$$\sigma = \frac{L}{(R - 2R_c)tW}$$

составляет  $\sigma = 11 (\text{Ом} \cdot \text{см})^{-1}$  и разумно согласуется с данными измерений, сделанных до нанесения полосковых контактов  $\sigma_0 \approx 8 (\text{Ом} \cdot \text{см})^{-1}$ . Для пластины В аналогичные измерения дают значения  $\sigma \approx 30 (\text{Ом} \cdot \text{см})^{-1}$  ( $\sigma_0 \approx 32 (\text{Ом} \cdot \text{см})^{-1}$ ).

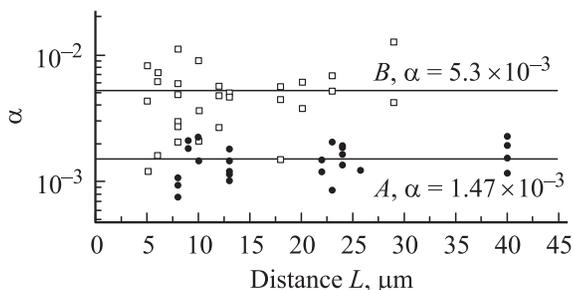
Во всех измеренных образцах шум при комнатной температуре имел форму  $1/f^\gamma$  с величиной  $\gamma$ , близкой к 1 (фликкер-шум). Спектральная плотность токового шума  $S_I$  во всем диапазоне токов была пропорциональна квадрату тока:  $S_I \propto I^2$ . На рис. 2 в качестве примера представлены зависимости  $S_I(I)$  для нескольких образцов (пластина В), измеренные на частоте анализа 6 Гц.

Шумовые характеристики различных приборов и материалов, как правило, оцениваются величиной безразмерного параметра Хоуге  $\alpha$  [13]:

$$\alpha = \frac{S_I}{I^2} f N, \quad (1)$$

где  $f$  — частота анализа,  $N$  — полное число носителей в образце.

Величина  $\alpha$  весьма чувствительна к структурному совершенству материала (см., например, [14]). Для структурно совершенных пленок Si значение  $\alpha$  составляет обычно  $10^{-4} - 10^{-5}$ . Для эпитаксиальных пленок GaAs характерное значение  $\alpha$  равняется  $10^{-3} - 10^{-5}$ . Для пленок GaN стандартного качества с концентрацией  $N_d - N_a \approx 10^{17} \text{ см}^{-3}$  величины  $\alpha$ , как правило, гораздо выше и лежат в пределах  $10^{-2} - 1$  [14]. Как было показано в работе [15], легирование пленок GaN кремнием



**Рис. 3.** Значения параметра Хоуге  $\alpha$  для образцов, изготовленных на пленках *A* и *B*.

до концентрации  $N_d - N_a \approx 10^{18} \text{ см}^{-3}$  заметно уменьшает значение  $\alpha$  ( $\alpha \approx 2 \cdot 10^{-3}$ ). Следовало ожидать поэтому, что значение параметра Хоуге в пленке *B* (при равном уровне структурной неупорядоченности) окажется существенно меньше, чем в пленке *A*.

На рис. 3 показаны значения  $\alpha$ , рассчитанные в соответствии с выражением (1) для большого числа образцов, изготовленных на обеих пленках. Видно, что результат эксперимента полностью противоречит предсказанию, основанному на предположении об одинаковом структурном совершенстве пленок. Полученный результат выглядит тем убедительнее, что оценки показывают, что контактный шум, особенно в образцах с малым расстоянием  $L$ , должен вносить заметный вклад в общий шум структур (таким образом, измеренные значения  $\alpha$  представляют собой оценку „сверху“). Между тем, как показано выше, сопротивление контактов к образцам, изготовленным на пленке *A*, существенно выше, чем контактное сопротивление у образцов на пленке *B*. Следует заключить, что и вклад контактного шума в общий шум больше для образцов, изготовленных на пленке *A*. Поэтому разница между *объемным* шумом  $1/f$  в образцах типов *A* и *B* еще больше, чем это следует из рис. 3.

Заметим, что даже полученная оценка „сверху“ для параметра Хоуге в образцах, изготовленных на пластине *A*, является рекордно низкой для тонких эпитаксиальных пленок GaN [14].

Работа выполнена при поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (проекты № 02-02-16496 и № 02-02-17619).

## Список литературы

- [1] V. Adivarahan, M. Gaevski, W.H. Sun, H. Fatima, A. Koudymov, S. Saygi, G. Simin, J. Yang, M. Asif Khan, A. Tarakji, M.S. Shur, R. Gaska. *IEEE Trans. Electron. Dev.*, **24**, 541 (2003).
- [2] M.S. Shur, M. Asif Khan. *Semicond. Semimet.*, **57**, 407 (2002).
- [3] R.J. Trew. *Proc. IEEE*, **90**, 1032 (2002).
- [4] V. Kumar, W. Lu, R. Schwindt, A. Kuliev, G. Simin, J. Yang, M. Asif Khan, I. Adesida. *IEEE Electron. Dev. Lett.*, **23**, 455 (2002).

- [5] X. Hu, A. Koudymov, G. Simin, J. Yang, M. Asif Khan, A. Tarakji, M.S. Shur, R. Gaska. *Appl. Phys. Lett.*, **79**, 2832 (2001).
- [6] F.A. Ponce. *MRS Bulletin*, **22**, 51 (1997).
- [7] N.V. Shmidt, A.G. Kolmakov, A.D. Kryzhanovsky, V.V. Ratnikov, A.N. Titkov. *Inst. Phys. Conf., Ser.* **169**, 303 (2001).
- [8] A.B. Анкудинов, А.Г. Колмаков, В.В. Лундин, В.В. Ратников, Н.М. Шмидт, А.А. Ситникова, А.Н. Титков. *Тез. докл. VI конф. по физике полупроводников (СПб., 2003)* с. 92.
- [9] N.M. Shmidt, A.I. Besulkin, M.S. Dunaevsky, A.G. Kolmakov, A.V. Sakharov, A.S. Usikov. *J. Phys.: Condens. Matter*, **14**, 13025 (2002).
- [10] N.M. Shmidt, V.V. Emtsev, A.G. Kolmakov, W.V. Lunding, D.S. Poloskin, A.N. Titkov, A.S. Usikov. *Nanotechnology*, **12**, 471 (2001).
- [11] M.E. Levinshtein, S.L. Rummyantsev, M.S. Shur, R. Gaska, M. Asif Khan. *IEE Proc. Circuits, Devices and Systems (Special Issue „Selected topics on noise in semiconductor devices“)*, **149**, 32 (2002).
- [12] M. Shur. *GaAs devices and circuits* (Plenum Press, N.Y.-London, 1987).
- [13] F.N. Hooge, T.G.M. Kleinpenning, L.K.J. Vandamme. *Rep. Progr. Phys.*, **44**, 479 (1981).
- [14] M.E. Levinshtein, A.A. Balandin, S.L. Rummyantsev, M.S. Shur. In: *Noise and Fluctuations Control in Electronic Devices*, ed. by A. Balandin (American Scientific Publishers, 2002).
- [15] S.L. Rummyantsev, N. Pala, M.S. Shur, R. Gaska, M.E. Levinshtein, M. Asif Khan, G. Simin, X. Hu, J. Yang. *Electron. Lett.*, **37**, 720 (2001).

Редактор Т.А. Полянская

## Low-frequency noise in GaN epilayers with different degree of order of the mosaic structure

N.M. Shmidt, M.E. Levinshtein, W.V. Lunding, A.I. Besyulkin, P.S. Kopiev, S.L. Rummyantsev\*, N. Pala\*, M.S. Shur\*

loffe Physicotechnical Institute,  
Russian Academy of Sciences,  
194021 St. Petersburg, Russia

\* Department of Electrical,  
Computer, and Systems Engineering,  
CII 9017, Rensselaer Polytechnic Institute,  
Troy NY 12180-3590, USA

**Abstract** The correlation between the level of the  $1/f$  noise and the degree of mosaic order of the GaN epilayers has been investigated for the first time. Samples with the doping level of  $N_d - N_a \approx 8 \times 10^{16} \text{ cm}^{-3}$  and high degree of order is characterized by values of the Hooge parameter  $\alpha \approx 1.5 \times 10^{-3}$ . This magnitude of  $\alpha$  is the lowest reported value for thin GaN epilayers. For the samples with  $N_d - N_a \approx 1.1 \times 10^{18} \text{ cm}^{-3}$  and low degree of order, the value of  $\alpha$  is remarkably larger ( $\alpha \approx 5.5 \times 10^{-3}$ ) in spite of the fact that for samples with the same degree of order the value of  $\alpha$  decreases, as a rule, as doping increases. It was concluded that the degree of the mosaic order affected not only optical and electrical, but also fluctuation characteristics of GaN epilayers.