

Низкочастотный шум в *n*-GaN

© Н.В. Дьяконова, М.Е. Левинштейн, S. Contreras*, W. Knap*, B. Beaumont†, P. Gibart†

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

* G.E.S., UMR-CNRS 5650, cc074, Universite Montpellier II, Place Eugene Bataillon,
F-34095 Montpellier, France

† CRHEA, rue Bernard Gregory, F-06560 Valbonne, France

(Получена 9 сентября 1997 г. Принята к печати 15 сентября 1997 г.)

Низкочастотный шум исследован в гексагональном нитриде галлия (GaN) *n*-типа проводимости с равновесной концентрацией электронов при 300 К $n_0 = 7 \cdot 10^{17} \text{ см}^{-3}$. Частотные и температурные зависимости спектральной плотности шума S_f/I^2 исследованы в диапазоне частот анализа $20 \text{ Гц} < f < 20 \text{ кГц}$ в области температур $80 < T < 400 \text{ К}$. Во всем исследованном диапазоне температур темновой шум близок к зависимости $S_f/I^2 \sim 1/f$ (фликкер-шум). Уровень шума слабо зависит от температуры и характеризуется весьма высокими значениями постоянной Хоуге $\alpha \simeq 5 \div 7$, что указывает на низкий уровень структурного совершенства материала. Впервые исследовано влияние инфракрасной и зона-зонной подсветки на низкочастотный шум в GaN. Фотоны с энергией $E_{\text{ph}} < E_g$ (E_g — ширина запрещенной зоны) не влияют на низкочастотный шум даже при сравнительно высоком уровне фотопроводимости $\Delta\sigma/\sigma \simeq 0.5$. Зона-зонная подсветка ($E_{\text{ph}} > E_g$) влияет на уровень низкочастотного шума во всей исследованной области температур. При сравнительно высокой температуре характер влияния подсветки качественно сходен с влиянием зона-зонной подсветки на низкочастотный шум в Si и GaAs. При относительно низких температурах характер влияния подсветки на шум в GaN качественно отличается от данных, полученных ранее для Si и GaAs.

1. Введение

Нитрид галлия (GaN) принадлежит к числу полупроводниковых материалов, которые исследуются в последние годы наиболее интенсивно. Успехи в технологии этого прямозонного полупроводника с широкой запрещенной зоной ($E_g = 3.4 \text{ эВ}$) продемонстрировали перспективность его использования для изготовления голубых и фиолетовых светодиодов и лазеров [1,2], ультрафиолетовых фотодетекторов, приборов с использованием поверхностных акустических волн и т.д. (см., например, серию обзоров [1–3] в бюллетене MRS, N2, февраль 1997). Высокое значение максимальной скорости электронов v_{max} и насыщенной скорости v_s ($v_{\text{max}} \simeq 2.7 \cdot 10^7 \text{ см/с}$, $v_s \simeq 1.5 \cdot 10^7 \text{ см/с}$ [4–5]) в сочетании с большой шириной запрещенной зоны делают GaN исключительно перспективным материалом для высокотемпературной высокочастотной электроники. Уже в настоящее время с использованием GaN и соединений на его основе созданы полевые транзисторы с частотой генерации, превосходящей 70 ГГц [6].

Хорошо известно, что уровень низкочастотного шума является одним из важнейших параметров любого СВЧ генератора и фотодетектора, часто определяющим возможность практического использования прибора. Кроме того, уровень низкочастотного шума позволяет судить о степени структурного совершенства материала [7,8], а исследование поверхностного и контактного шума может быть использовано для неразрушающего контроля качества как готовых приборов, так и отдельных технологических операций [9,10]. Это особенно важно для GaN, поскольку, несмотря на впечатляющие успехи технологии последних лет, структура слоев недостаточно

совершенна и методы поверхностной обработки и изготовления контактов нуждаются в оптимизации [11,12]. Тем не менее, насколько нам известно, данные об уровне низкочастотного шума в GaN в литературе отсутствуют. В настоящей работе исследован низкочастотный шум в образцах нитрида галлия *n*-типа проводимости с концентрацией электронов при комнатной температуре $n_0 = 7 \cdot 10^{17} \text{ см}^{-3}$.

2. Условия эксперимента

Исследовались образцы гексагонального политипа *n*-GaN, полученные эпитаксией на сапфировой подложке. На подложке выращивался при 600°C буферный слой GaN толщиной 250 Å, затем слой GaN толщиной 0.8 мкм при 1080°C , затем слой AlN толщиной 200 Å (1080°C). Поверх слоя AlN при 1080°C выращивался исследуемый слой GaN толщиной 1.0 мкм с концентрацией электронов при комнатной температуре $n_0 = 7 \cdot 10^{17} \text{ см}^{-3}$.

Контакты Ni–Au наносились на поверхность пленки. Расстояние между токовыми контактами L составляло 2240 мкм, расстояние между потенциальными контактами $l = 140 \text{ мкм}$. Две пары потенциальных и две пары токовых контактов позволяли качественно судить о степени однородности электрофизических параметров образца.

Среднее значение холловской подвижности при $T = 300 \text{ К}$ составляло $\mu_H \simeq 45 \text{ см}^2/\text{В} \cdot \text{с}$. С понижением температуры μ_H слегка возрастает и достигает максимальной величины $\mu_H \simeq 60 \text{ см}^2/\text{В} \cdot \text{с}$ при $T \simeq 100 \text{ К}$. Вычисленная по данным холловских измерений глубина залегания донорного уровня составила $\Delta E_d \simeq 260 \text{ мВ}$.

Измеренное значение подвижности при 300 К и слабая температурная зависимость подвижности свидетельствуют о значительном уровне компенсации материала [13]. Измерения, проведенные на различных парах холловских и потенциальных контактов, указывают на существенную неоднородность электрофизических параметров.

3. Результаты эксперимента и обсуждение

3.1. Роль контактов

На вставке к рис. 1 показаны вольт-амперные характеристики (ВАХ) образца при 77 и 300 К. При напряжениях $V \lesssim 0.7$ В точные измерения указывают на слабую суперлинейность ВАХ. При $V \gtrsim 1.5 \div 2$ В вольт-амперная характеристика практически линейна. Уровень неомичности, определяемый как отношение сопротивления образца R_{1c} при $V < kT$ (~ 10 мВ) к сопротивлению R_0 при $V \gtrsim 2$ В, практически постоянен во всем исследованном температурном диапазоне $77 \div 400$ К и составляет $R_{1c}/R_0 \simeq 1.15 \div 1.20$. Значение сопротивления, рассчитанное исходя из геометрических размеров образца, величины подвижности и измеренных значений концентрации, хорошо совпадает с измеренным значе-

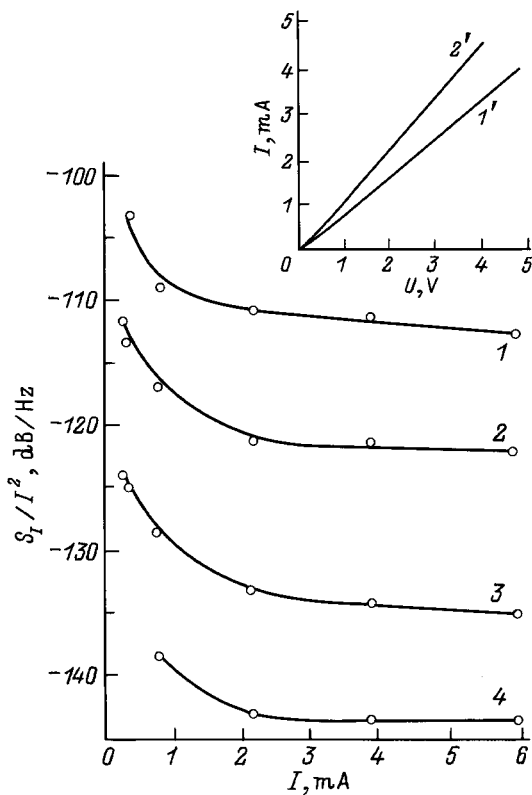


Рис. 1. Зависимости относительной спектральной плотности шума S_I/I^2 от протекающего через образец тока I для различных частот анализа f , Гц: 1 — 20, 2 — 160, 3 — 2560, 4 — 20000. $T = 300$ К. На вставке — вольт-амперные характеристики образца; T , К: 1' — 300, 2' — 77.

нием R_0 . Все это указывает на достаточно хорошее качество контактов и относительно невысокий потенциальный барьер в приконтактной области [14].

Известно, однако, что даже относительно слабая неомичность контактов может приводить к резкому росту низкочастотных шумов [15] и отклонению от "классической" зависимости спектральной плотности шума (S_I) от протекающего через образец тока (I): $S_I \sim I^2$ [16].

На рис. 1 показана зависимость относительной спектральной плотности шума S_I/I^2 от протекающего через образец тока I при измерениях по двухточечной схеме, когда шум измеряется на тех же контактах, через которые пропускается ток. Видно, что при малых токах ($I \lesssim 2$ мА), что соответствует напряжениям на образце $V \lesssim 2$ В, величина S_I/I^2 растет с уменьшением тока, что прямо указывает на определяющий вклад контактных шумов в общий шум. Напротив, при $I \gtrsim 2$ мА величина S_I/I^2 не зависит от I , и отсюда следует, что вкладом контактных шумов можно, по-видимому, пренебречь. Измерения шумов по четырехточечной (потенциальной) схеме, когда образец питался от генератора тока, а входное сопротивление измерительной схемы на много порядков превышало сопротивление между потенциальными контактами, обнаружили полное совпадение с данными двухточечных измерений при больших напряжениях на образце ($V \gtrsim 2$ В).

Отмеченные закономерности характерны для всего исследованного температурного диапазона $77 \leq T \leq 400$ К.

3.2. Темновой низкочастотный шум

На рис. 2 показаны частотные зависимости относительной спектральной плотности шума при $T = 77$ К (кривая 1), комнатной температуре (кривая 2) и $T = 387$ К (кривая 3), измеренные на потенциальных контактах. Видно, что при всех температурах наклон зависимости $S(f)$ близок к $S \sim 1/f$. Уровень шума довольно слабо и немонотонно зависит от температуры.

Шумовые свойства различных материалов часто характеризуют величиной безразмерного параметра Хоуге α [17]:

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

где f — частота анализа, N — полное число носителей.

Для одного и того же материала в зависимости от уровня структурного совершенства материала, наличия внутренних напряжений, плотности дислокаций и т.д. значения α могут различаться на много порядков. Для кремния, например, измеренные величины α лежат в пределах от 10^{-8} до 10^{-1} (см. ссылки в [8]), для GaAs — от 10^{-8} до 10^{-1} [18], для SiC — от 10^{-6} до 1 [19,20]. Чем выше уровень структурного совершенства материала, тем меньше величина α .

Объем GaN между потенциальными контактами V составлял $140 \times 700 \times 1 \text{ мкм}^3 \simeq 10^{-7} \text{ см}^3$, что соответствует полному числу носителей в измеряемом объеме

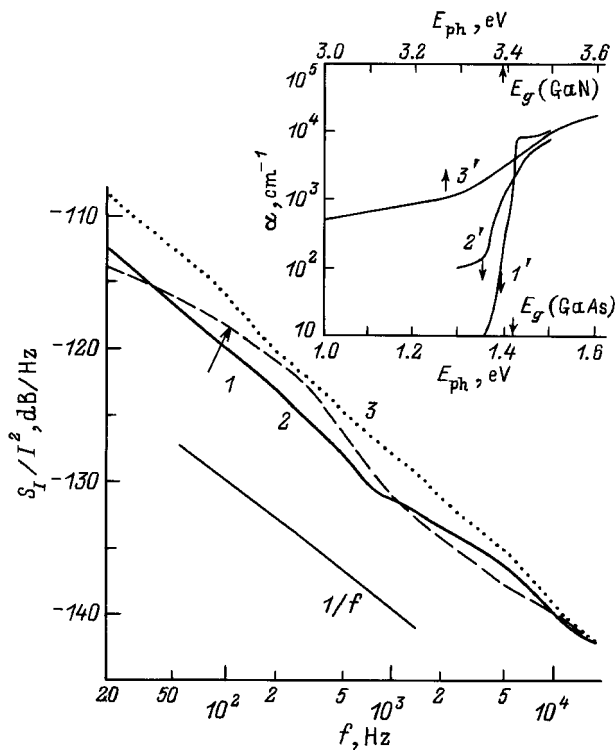


Рис. 2. Частотные зависимости относительной спектральной плотности шума S_I/I^2 при температурах T , К: 1 — 77, 2 — 293, 3 — 387. На вставке — зависимости коэффициента поглощения α от энергии фотонов E_{ph} для чистого GaAs с уровнем легирования $N_d \approx 5 \cdot 10^{13} \text{ см}^{-3}$ (1'), легированного GaAs с $N_d \approx 6.7 \cdot 10^{18} \text{ см}^{-3}$ (2') и чистого GaN с $N_d \approx 2 \cdot 10^{16} \text{ см}^{-3}$ (3') при $T = 300 \text{ К}$; стрелками на горизонтальных осях показана ширина запрещенной зоны E_g GaAs и GaN при 300 К.

$N = n_0V \approx 7 \cdot 10^{10}$. Таким образом, измеренная величина α при комнатной температуре составляет $\alpha \approx 5 \div 7$. Эта величина на порядок больше установленной для SiC в работе [19]. Тем не менее столь большое значение постоянной Хоуге при современном уровне технологии GaN не является неожиданным. Даже для лучших образцов GaN плотность дислокаций составляет $10^8 \div 10^9 \text{ см}^{-2}$. Для образцов нитрида галлия характерен высокий уровень внутренних напряжений, значительные неоднородности и т. д.

Еще одним параметром, чувствительным к уровню структурного совершенства материала, является плотность состояний $\rho(E)$ в хвостах плотности состояний в запрещенной зоне полупроводника вблизи краев зоны проводимости и валентной зоны. Более того, существует прямая связь между уровнем объемного шума $1/f$ в полупроводниках и $\rho(E)$ [8]. О плотности состояний $\rho(E)$ можно судить по коэффициенту поглощения света с энергией фотонов E_{ph} , несколько меньшей, чем ширина запрещенной зоны полупроводника E_g . На вставке к рис. 2 показаны зависимости коэффициента поглощения от энергии фотонов $\alpha(E_{ph})$ для чистого и легирован-

ного GaAs [21] и чистого GaN [22]. Видно, что даже в чистом GaN с концентрацией остаточной примеси $N_d \approx 2 \cdot 10^{16} \text{ см}^{-3}$ плотность состояний вблизи края зоны проводимости существенно выше, чем в GaAs с уровнем легирования $N_d \approx 7 \cdot 10^{18} \text{ см}^{-3}$.

3.3. Низкочастотный шум в условиях подсветки

Для установления природы шума $1/f$ в Si и GaAs ранее была успешно применена методика перезарядки неосновными носителями (дырками) уровней, формирующих хвост плотности состояний. Дырки создавались в Si и GaAs с помощью зона-зонной подсветки (см., например, [18]).

В настоящей работе мы впервые исследовали влияние инфракрасной и зона-зонной подсветки на низкочастотный шум в GaN.

Подсветка точечной лампой накаливания мощностью 100 Вт приводила к заметной фотопроводимости ($\Delta\sigma/\sigma \approx 25\%$ при 300 К), однако она не влияла на низкочастотный шум в GaN во всем исследованном температурном диапазоне от 77 до 400 К.

Зона-зонная подсветка осуществлялась с помощью галогенной лампы ГКЛ-100 с кварцевым баллоном, позволяющей снимать спектры пропускания вплоть до длин волн $\sim 0.31 \text{ мкм}$ ($E_{ph} \approx 4 \text{ эВ}$). Между лампой и образцом размещались фильтры СЗС-25 + УФС-5. Фильтр УФС-5 практически полностью поглощает излучение в области длин волн $0.42 \div 0.65 \text{ мкм}$; фильтр СЗС-25 достаточно эффективно поглощает излучение в области длин волн $\lambda \gtrsim 0.7 \text{ мкм}$. В таких условиях основной компонентой подсветки являются фотоны с энергией, близкой к ширине запрещенной зоны GaN ($E_g \approx 3.4 \text{ эВ}$, $\lambda \approx 0.36 \text{ мкм}$).

На рис. 3 приведены частотные зависимости относительной спектральной плотности шума в темноте и в условиях зона-зонной подсветки при $T = 102$ и 370 К. Фотопроводимость при $T = 102 \text{ К}$ составляла $\Delta\sigma/\sigma \approx 37\%$. При этом в соответствии с выражением (1) уровень шума должен понизиться на всех частотах анализа приблизительно на 1.4 дБ просто за счет увеличения числа носителей. При построении кривой 1' значения S_I/I^2 увеличены на 1.4 дБ на всех частотах анализа, т. е. кривая 1' приведена к исходной темновой концентрации носителей. При $T = 370 \text{ К}$ величина $\Delta\sigma/\sigma \approx 9\%$. При таком значении $\Delta\sigma/\sigma$ погрешность из-за увеличения числа носителей меньше точности измерений шума ($\pm 5 \text{ дБ}$).

Основной качественный результат состоит в том, что зона-зонная подсветка заметно изменяет уровень низкочастотного шума и что характер влияния подсветки сильно зависит от температуры. На основании этого результата можно сделать вывод, что, так же как в Si и GaAs, наблюдающийся в GaN шум определяется флуктуацией заселенности каких-то групп близко расположенных уровней или зон плотности состояний в запрещенной зоне.

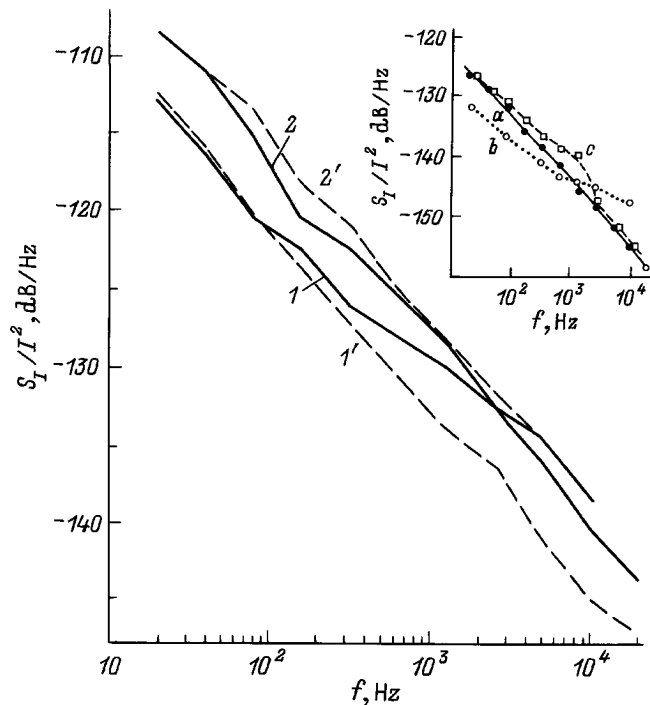


Рис. 3. Частотные зависимости относительной спектральной плотности шума в темноте (сплошные кривые) и в условиях зона-зонной подсветки (штриховые кривые) при $T = 102$ (1, 1') и 370 К (2, 2'). На вставке — аналогичные зависимости для GaAs с уровнем легирования $N_d = 10^{15} \text{ см}^{-3}$ при 300 К [24]: *a* — в темноте, *b* — при максимальной интенсивности подсветки $J = J_0$, *c* — при интенсивности подсветки $J = 10^{-3} J_0$.

Однако имеющиеся данные не дают возможности сделать заключение о характере и локализации этих зон.

В случае, когда за шум типа $1/f$ ответственны флуктуации заселенности уровней, образующих экспоненциально спадающий в глубь запрещенной зоны хвост плотности состояний, теория [23] (см. также [8]) предсказывает немонотонную зависимость уровня шума от интенсивности подсветки. На каждой частоте анализа шум по мере увеличения интенсивности вначале растет, затем достигает максимума, а затем, с дальнейшим увеличением интенсивности, падает до уровня ниже темнового. Причем, чем ниже частота анализа, тем при более слабых интенсивностях подсветки шум достигает максимума и начинает уменьшаться. Это предсказание теории хорошо совпадает с экспериментальными результатами для Si и GaAs [8].

На вставке к рис. 3 показаны экспериментальные результаты для GaAs, полученные в работе [24]. Влияние подсветки на шум при высокой температуре в GaN (рис. 3, кривая 2') качественно сходно с аналогичным влиянием зона-зонной подсветки в GaAs (ср. с кривой *c* вставки). То обстоятельство, что подавления шума при подсветке в GaN при $T = 370$ К не наблюдается, объясняется, вероятно, просто тем, что интенсивность потока квантов с $E_{ph} \geq E_g$ слишком мала.

При низкой температуре (кривые 1, 1') экспериментальные результаты для GaN качественно расходятся с теорией [23]. Видно, что на высоких частотах зона-зонная подсветка подавляет шум, в то время как на высоких частотах анализа свет на шум не влияет. Такая ситуация несовместима с предсказанием теории [23].

Заключение

Исследование низкочастотного шума в GaN свидетельствует о низком уровне структурного совершенства материала. Чрезвычайно актуальным представляется исследование низкочастотного шума, в том числе и шума $1/f$, в образцах с различным уровнем легирования и подвижности. Первые эксперименты по влиянию зона-зонной подсветки на низкочастотный шум в GaN *n*-типа проводимости свидетельствуют о существенном различии такого влияния в GaN и в исследованных ранее кремнии и арсениде галлия.

Авторы признательны В. Бугрову и И.А. Хребтову за помощь в работе, С. Румянцеву за обсуждение результатов.

Работа поддержана Российским фондом фундаментальных исследований (грант № 06-02-18563).

Список литературы

- [1] S.J. Pearton, C. Kuo. MRS Bulletin (February, 1997) p. 17.
- [2] S. Nakamura. MRS Bulletin (February, 1997) p. 29.
- [3] M.S. Shur, M.A. Khan. MRS Bulletin (February, 1997) p. 44.
- [4] M.A. Littlejohn, J.R. Hauser, T.H. Glisson. Appl. Phys. Lett., **26**, 625 (1975).
- [5] B. Gelmont, K.S. Kim, M. Shur. J. Appl. Phys., **74**, 1818 (1993).
- [6] M.A. Khan, M.S. Shur, J.N. Kuznia, J. Burn, W. Shaff. Appl. Phys. Lett., **66**, 283 (1995).
- [7] L.K.J. Vandamme, S. Oosterhoff. J. Appl. Phys., **59**, 3169 (1986).
- [8] Н.В. Дьяконова, М.Е. Левинштейн, С.Л. Румянцев. ФТП, **25**, 2065 (1991).
- [9] L.K.J. Vandamme. IEEE Trans. Electron. Dev., **41**, 2176 (1994).
- [10] D. Ursutiu, B.K. Jones. Semicond. Sci. Technol., **11**, 1133 (1996).
- [11] F.A. Ponce. MRS Bulletin (February, 1997) p. 51.
- [12] D.B. Ingerly, J.A. Chang, N.R. Perkins, T.F. Kuech. Appl. Phys. Lett., **70**, 108 (1996).
- [13] D.K. Gaskill, L.B. Rowland, K. Doverprike. In: *Properties of Group III Nitrides*, ed. by J.H. Edgar [EMIS Datareviews ser. (INSPEC publication, 1994) N 11].
- [14] Ю.А. Гольдберг. ФТП, **28**, 1681 (1994).
- [15] R.D. Black, M.B. Weissman, P.J. Restle. Appl. Phys. Lett., **53**, 6280 (1982).
- [16] R.F. Voss, J. Clark. Phys. Rev. B, **13**, 556 (1976).
- [17] F.N. Hooge, T.G.M. Kleinpenning, L.K.J. Vandamme. Rep. Progr. Phys., **44**, 479 (1981).
- [18] F.N. Hooge, M. Tacano. Physica B, **190**, 145 (1993).

- [19] S. Tehrani, L.L. Hench, C.M. Van Vliet, G.S. Bosman. *J. Appl. Phys.*, **58**, 1571 (1985).
- [20] J.V. Palmour, M.E. Levinshtein, S.L. Rumyantsev, G.S. Simin. *Appl. Phys. Lett.*, **68**, 2669 (1996).
- [21] H.C. Casey, D.D. Sell, K.W. Weight. *J. Appl. Phys.*, **46**, 250 (1975).
- [22] O. Ambacher, W. Rieger, M. Stutzman. *Abstract Book Topical Workshop on III-V Nitrides* (Nagoya, Sept., 1995) p. F-5.
- [23] Н.В. Дьяконова, М.Е. Левинштейн. *ФТП*, **23**, 283 (1989).
- [24] Н.В. Дьяконова. *ФТП*, **25**, 358 (1991).

Редактор Л.В. Шаронова

Low frequency noise in *n*-GaN

N.V. Dyakonova, M.E. Levinshtein, S. Contreras*,
W. Knap*, B. Beaumont†, P. Gibart†

A.F. Ioffe Physicotechnical Institute,
Russian Academy of Sciences,
194021 St.Petersburg, Russia

* G.E.S., UMR-CNRS 5650, cc074,
Universite Montpellier II,
F-34095 Montpellier, France

† CRHEA, rue Bernard Gregory,
F-06560 Valbonne, France

Abstract Low frequency noise has been investigated in hexagonal polytype of gallium nitride (GaN) of *n*-type with equilibrium electron concentration at 300 K $n_0 \simeq 7 \cdot 10^{17} \text{ cm}^{-3}$. The frequency and temperature dependences of spectral density of noise S_I/I^2 were studied in the range of the analysis frequency f from 20 Hz to 20 kHz in the temperature range from 80 to 400 K. Over the whole temperature range the slope of S_I/I^2 versus f dependence is very close to the $1/f$ (flicker noise). The temperature dependence of the noise is rather weak. The value of Hooge constant α is very large: $\alpha \simeq 5 \div 7$. These large α values indicate rather low level of the structural quality of the material. The effects of the infrared and band-to-band illumination on the low frequency noise in GaN have been studied for the first time. The noise level is unaffected by illumination with photon energy $E_{\text{ph}} < E_g$ (E_g is the band gap) even at a relatively high photoconductivity value $\Delta\sigma/\sigma \simeq 50\%$. Band-to-band illumination ($E_{\text{ph}} \geq E_g$) has influence on the low frequency noise level over the whole temperature range investigated. At relatively high temperatures the influence of the illumination is qualitatively similar to the effect of band-to-band illumination on the low frequency noise in Si and GaAs. At relatively low temperatures the influence of the illumination on the noise in GaN differs qualitatively from the results obtained earlier for Si and GaAs.

E-mail: melev@nimis.ioffe.rssi.ru

* E-mail: sylvie.jarrix@cem2.univ-montp2.fr

† E-mail: bb@crheal.unice.fr