

УДК 621.382

ВОЗБУЖДЕНИЕ КОРОТКИХ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ МОНОИМПУЛЬСОВ В ПЛЕНКАХ НИТРИДОВ ПРИ ОТРИЦАТЕЛЬНОЙ ДИФФЕРЕНЦИАЛЬНОЙ ПРОВОДИМОСТИ***С. В. КОШЕВАЯ, В. В. ГРИМАЛЬСКИЙ, Д. ЭСКОБЕДО-АЛАТОРРЕ, М. ТЕКПОЙОТЛЬ-ТОРРЕС***Автономный университет штата Морелос,
Мексика, Куэрнавака, Z. P. 62209*

Аннотация. Теоретически исследовано возбуждение коротких электрических моноимпульсов волн пространственного заряда с широким частотным спектром, лежащим в терагерцовом диапазоне, в пленках нитридов. Возбуждение этих импульсов с длительностями ≤ 5 пс с высокими пиковыми значениями электрических полей возможно в пленках n -GaN или n -InN субмикронных толщин при наличии отрицательной дифференциальной проводимости. При моделировании нелинейной динамики импульсов учтена не локальная зависимость дрейфовой электронной скорости от средней электронной энергии. Указаны оптимальные значения приложенных постоянных электрических полей и равновесной концентрации электронов для возбуждения моноимпульсов. Динамика моноимпульсов слабо зависит от ширины пленки, а также от величины и формы входных возбуждающих импульсов. Короткие электрические моноимпульсы отличаются от доменов сильного электрического поля в диодах Ганна на объемных кристаллах с отрицательной дифференциальной проводимостью.

Ключевые слова: пленка нитридов; отрицательная дифференциальная проводимость; волна пространственного заряда; электрический моноимпульс

1. ВВЕДЕНИЕ

В настоящее время широко исследуются активные и управляющие устройства терагерцового (ТГц) диапазона [1–7]. Нитриды галлия и индия GaN, InN используются в нижней части ТГц диапазона $f = 0,1$ –1 ТГц [8–15]. Волны пространственного заряда (ВПЗ) в пленках n -GaN или n -InN усиливаются при наличии отрицательной дифференциальной проводимости (ОДП), если значения приложенных постоянных электрических полей выше определенных пороговых (рис. 1).

Геометрия задачи представлена на рис. 1а, где пленка n -InN или n -GaN занимает область $0 < x < 2l$, при $x > 2l$ вакуум, при $x < 0$ находится подложка из диэлектрика с проницаемостью $\epsilon_1 = 4$, I — входная антенна, II — выходная антенна. На рис. 1б представлены зависимости дрейфовой скорости от электрического поля в n -GaN кубической симметрии (кривая 1) и в n -InN кубической симметрии (кривая 2). Зависимости средней электронной энергии от электрического поля представлены на рис. 1в.

Используются следующие свойства нитридов: высокие значения критических посто-

* Авторы благодарны SEP-CONACyT, Mexico, за поддержку нашей работы.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Lee, Yun-Shik. *Principles of Terahertz Science and Technology*. N.Y.: Springer, 2009. 340 p. DOI: [10.1007/978-0-387-09540-0](https://doi.org/10.1007/978-0-387-09540-0).
2. Perenzoni, M.; Paul, D. J. (eds.). *Physics and Applications of Terahertz Radiation*. N.Y.: Springer, 2014. 255 p. DOI: [10.1007/978-94-007-3837-9](https://doi.org/10.1007/978-94-007-3837-9).
3. Song, Ho-Jin; Nagatsuma, Tadao (eds.). *Handbook of Terahertz Technologies: Devices and Applications*. CRC Press, Boca Raton, FL, 2015, 585 p. URI: <https://www.crcpress.com/Handbook-of-Terahertz->

[Technologies-Devices-and-Applications/Song-Nagatsuma/p/book/9789814613088](#).

4. Carpintero, G.; Garcia Munoz, L. E.; Hartnagel, H. L.; Preu, S.; Rdisnien, A. V. (eds.). *Semiconductor Terahertz Technology: Devices and Systems at Room Temperature Operation*. N.Y.: John Wiley & Sons, 2015. 386 p. DOI: [10.1002/9781118920411](#).

5. Nakasha, Y. "Foreword," *IEICE Trans. Electronics*, Vol. E98.C, No. 12, 2015. DOI: [10.1587/transele.E98.C.1058](#).

6. Ваксм В.Л.; Бирюков, В.В.; Кисиленко, К.И.; Панин, А.Н.; Приползин, С.И.; Раевский, А.С.; Щербачков, В.В. "Системы беспроводной связи терагерцового частотного диапазона," *Журнал радиоэлектроники*, № 12, С. 1–9, 2018. DOI: [10.30898/1684-1719.2018.12.4](#).

7. Лукин, К.А.; Максимов, П.П. "Терагерцовые автоколебания в инжекционном р-п-переходе с постоянным обратным смещением," *Известия вузов. Радиоэлектроника*, Т. 53, № 8, С. 16–22, 2010. URI: [http://radio.kpi.ua/article/view/S0021347010080029](#).

8. Pearton, S. J.; Zolper, J. C.; Shul, R. J.; Ren, F. "GaN: processing, defects, and devices," *J. Appl. Phys.*, Vol. 86, No. 1, p. 1–79, 1999. DOI: [10.1063/1.371145](#).

9. Jain, S. C.; Willander, M.; Narayan, J.; Van Overstraeten, R. "III-nitrides: Growth, characterization, and properties," *J. Appl. Phys.*, Vol. 87, No. 3, p. 965–1006, 2000. DOI: [10.1063/1.371971](#).

10. Gruzinski, V.; Shiktorov, P.; Starikov, E.; Zhao, J. H. "Comparative study of 200–300 GHz microwave power generation in GaN TEDs by the Monte Carlo technique," *Semicond. Sci. Technol.*, Vol. 16, No. 8, p. 798–805, 2001. DOI: [10.1088/0268-1242/16/9/311](#).

11. Ли, J. Т.; Cao, J. С. "Terahertz generation and chaotic dynamics in GaN NDR diode," *Semicond. Sci. Technol.*, Vol. 19, No. 4, p. 451–456, 2004. DOI: [10.1088/0268-1242/19/3/028](#).

12. Тимофеев, В.И.; Семеновская, Е.В.; Фалеева, Е.М. "Электротепловой анализ мощных субмикронных полевых гетеротранзисторов на основе нитрида галлия," *Известия вузов. Радиоэлектроника*, Т. 59, № 2, С. 23–32, 2016. DOI: [10.20535/s0021347016020035](#).

13. Шеремет, В.Н. "Особенности формирования и свойства омических контактов к p-GaN(AlN) и синтетическому алмазу," *Известия вузов. Радиоэлектроника*, Т. 56, № 10, С. 42–56, 2013. DOI: [10.20535/s002134701310004x](#).

14. Коколов, А.А.; Бабак, Л.И. "Методика построения и верификация нелинейной модели ЕЕНЕМТ для GaN НЕМТ транзистора," *Известия вузов. Радиоэлектроника*, Т. 58, № 10, С. 3–14, 2015. DOI: [10.20535/s0021347015100015](#).

15. Levinshtein, M.; Rumyantsev, S.; Shur, M. "Properties of advanced semiconductor materials: GaN,

AlN, InN," 216 p. N.Y.: Wiley, 2001. URI: [http://www.ioffe.ru/SVA/NSM/Semicond/GaN/](#).

16. Grimalsky, V.; Koshevaya, S.; Moroz, I.; Garcia-B., A. "Influence of nonlocality on amplification of space charge waves in n-GaN films," *Proc. of Int. Symp. on Phys. and Engineering of Microwaves, Millimeter and Submillimeter Waves*, 21–26 June 2010, Kharkov, Ukraine. IEEE, 2010, p. 1–4. DOI: [10.1109/msmw.2010.5546135](#).

17. Grimalsky, V.; Koshevaya, S.; Tecpoyotl-T., M.; Diaz-A., F. "Influence of nonlocality on amplification of space charge waves in n-GaN films," *J. Electromagn. Analysis Appl.*, Vol. 3, No. 2, p. 33–38, 2011. DOI: [10.4236/jemaa.2011.32006](#).

18. Foltides, E. J.; Grimalsky, V.; Koshevaya, S.; Escobedo-Alatorre, J. "Amplification of space charge waves in n-InN films of THz range," *Proc. of IEEE MTT-S Latin America Microwave Conf.*, LAMC-2016, 12–14 Dec. 2016, Puerto Vallarta, Mexico. IEEE, 2016, p. 1–3. DOI: [10.1109/lamc.2016.7851269](#).

19. Hadi, W. A.; Guram, P. K.; Shur, M. S.; O'Leary S. K. "Steady-state and transient electron transport within wurtzite and zinc-blende indium nitride," *J. Appl. Phys.*, Vol. 113, No. 11, paper 113709, 2013. DOI: [10.1063/1.4795146](#).

20. Siddiqua, P.; Hadi, W. A.; Salhotra, A. K.; Shur, M. S.; O'Leary, S. K. "Electron transport and electron energy distributions within the wurtzite and zinc-blende phases of indium nitride: Response to the application of a constant and uniform electric field," *J. Appl. Phys.*, Vol. 117, No. 12, Paper 125705, 2015. DOI: [10.1063/1.4915329](#).

21. Sze, S. M.; Ng, Kwok N. *Physics of Semiconductor Devices*. Hoboken NJ: Wiley-Interscience, 2007. 815 p. DOI: [10.1002/0470068329](#).

22. Garcia-B., A.; Grimalsky, V.; Gutierrez-D., E.; Koshevaya, S. "Dispersion relation for two-valley quasi-hydrodynamic models in SCWs propagation in n-GaAs thin films," *Proc. of 25th Int. Conf. on Microelectronics*, 14–17 May 2006, Belgrade, Serbia. IEEE, 2006, p. 507–510. DOI: [10.1109/icmel.2006.1651013](#).

23. Tomizawa, K. *Numerical Simulation of Submicron Semiconductor Devices*. Boston: Artech House Pub., 1993. 356 p.

24. Press, W. H.; Teukolsky, S. A.; Vetterling, W. T.; Flannery, B. P. *Numerical Recipes in Fortran*. Cambridge: Cambridge Univ. Press, 1997. 1486 p.

25. Grimalsky, V.; Koshevaya, S.; Tecpoyotl-T., M.; Escobedo-A. "Nonlinear interaction of terahertz and optical waves in nitride films," *Terahertz Sci. Technol.*, Vol. 6, No. 3, p. 165–176, 2013.

Поступила в редакцию 20.12.2018

После доработки 31.05.2019

Принята к публикации 10.06.2019