

УДК 621.382.233

САМОВОЗДЕЙСТВИЕ СИЛЬНЫХ МИЛЛИМЕТРОВЫХ ВОЛН В ВОЛНОВОДАХ С ИНТЕГРАЛЬНЫМИ P-I-N-СТРУКТУРАМИ***И. МОРОЗ¹, В. В. ГРИМАЛЬСКИЙ², С. В. КОШЕВАЯ², А. КОЦАРЕНКО³**¹*Ровненский государственный гуманитарный университет,
Украина, Ровно, 33028, ул. Степана Бандеры, д.12*²*Автономный университет штата Морелос,
Мексика, Куэрнавака, Z. P. 62209*³*Автономный университет,
Мексика, Кармен, 24180*

Аннотация. Теоретически исследовано нелинейное взаимодействие миллиметровых электромагнитных волн высокого уровня мощности с кремниевыми интегральными $p-i-n$ -структурами, помещенными в металлический волновод. Проведена оценка уровня двойной инжекции носителей заряда вследствие детектирования электрического поля высокого уровня интенсивности миллиметрового диапазона в $p-i-n$ -структурах. Сформулирована математическая модель взаимного влияния электромагнитных волн и инжектированных носителей зарядов в активной области $p-i-n$ -структур. Найдено численное решение нелинейного уравнения Гельмгольца, дополненного надлежащими граничными условиями на границе активной области. Влияние электромагнитной волны высокого уровня мощности приводит к избыточной инжекции носителей в активную область полупроводника между p^+-i , n^+-i инжектирующими контактами и перераспределению электрического поля внутри структуры. Коэффициенты отражения и прохождения резко меняются с изменением входной амплитуды электромагнитной волны. Это приводит к бистабильности этих коэффициентов. Бистабильность более выражена в низкочастотной части мм диапазона.

Ключевые слова: интегральная $p-i-n$ -структура; миллиметровая волна; самовоздействие; бистабильность

1. ВВЕДЕНИЕ

$P-i-n$ -диоды широко используются в защитных и ограничительных микроволновых устройствах в качестве элементов управления [1–7]. В последние годы созданы управляющие электродинамические системы, основанные на интегральных $p-i-n$ -структурах, для мощных волн миллиметрового диапазона [3]. Эти структуры по управляющим параметрам превосходят объемные $p-i-n$ -диоды. Инте-

гральная поверхностно-ориентированная $p-i-n$ -структура представляет собой пластину, выполненную из высокорезистивного кремния или другого материала, где на одной из сторон изготовлен набор инжектирующих глубоких n^+-i и p^+-i переходов [8–10] (рис. 1а). Геометрия задачи представлена на рис. 1б. В поперечном сечении металлического волновода схематически представлен только один элемент $p-i-n$ -структуры. Глубина структуры $h =$

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

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Pozar, M., *Microwave Engineering*. N.Y.: Wiley, 2010. 736 p.
2. Kwok, K. Ng, *Complete Guide to Semiconductor Devices*. N.Y.: Wiley-Interscience, 2002. 740 p.
3. Sze, S.; Kwok, K. Ng, *Physics of Semiconductor Devices*. N.Y.: Wiley-Interscience, 2006. 815 p.
4. Гусятинер, М.С. “О сопротивлении потерь $p-i-n$ -структуры при прямом смещении,” *Электронная техника. Сер. Полупроводниковые приборы*, № 7, С. 54–57, 1970.
5. Либерман, Л.С., “О сопротивлении $p-i-n$ -диода на СВЧ,” *Электронная техника. Сер. Полупроводниковые приборы*, № 5, С. 16–21, 1971.
6. СВЧ устройства на полупроводниковых диодах. Проектирование и расчет. Под ред. И.В.Мальского, Б.А.Сестрорецкого. М.: Сов. радио, 1969, с. 414–572.
7. Адирович, Э.И.; Карагеоргий-Алкалаев, П.М.; Лейдерман, А.Ю., *Токи двойной инжекции в полупроводниках*. Под ред. Гальперина. М.: Сов. радио, 1978. 320 с.
8. Кошевая, С. В.; Кищенко, Я. И.; Смойловский, М. И.; Трапезон, В. А. “Быстродействующие широкополосные модуляторы на $p-i-n$ -структурах (Обзор),” *Известия вузов. Радиоэлектроника*, Т. 32, № 10, с. 14–23, 1989.
9. Grimalsky, V.; Koshevaya, S.; Zamudio-Lara, A.; Escobedo-Alatorre, J., “Terahertz modulators based on silicon $p-i-n$ -structures in dielectric waveguides,” *Terahertz Sci. Technol.*, Vol. 4, No. 2, P. 59–70, 2011.
10. Koshevaya, S. V.; Gutierrez, E. A.; Moroz, I.; Tespoyotl-T., M.; Grimalsky, V., “Injection problem in powerful quasi-optical modulator,” *Proc. of Int. Conference on Microwaves and Radar, MIKON-98*, 20–22 May 1998, Krakow, Poland. IEEE, 1998, Vol. 2, p. 348–350. DOI: [10.1109/MIKON.1998.740820](https://doi.org/10.1109/MIKON.1998.740820).
11. Карушкин, Н. Ф.; Коберидзе, А. В.; Юнисов, Л. Е. “Экспериментальное исследование $p-i-n$ -структур с толстой базой на высоком уровне мощности,” *Известия вузов. Радиоэлектроника*, Т. 33, № 3, с. 74–76, 1990.
12. Karushkin, N. F., “Millimeter-wave devices for modulation and switching,” *Telecom. Radio Eng.*, Vol. 63, No. 7–12, P. 607–619, 2005. DOI: [10.1615/TelecomRadEng.v63.i7.30](https://doi.org/10.1615/TelecomRadEng.v63.i7.30).
13. Запорожец, В. В.; Коберидзе, А. В.; Юнисов, Л. Е.; Яцюк, М. И. “Экспериментальное исследование СВЧ $p-i-n$ диодах аттенуаторов на высоком уровне мощности,” *Известия вузов. Радиоэлектроника*, Т. 30, № 5, с. 94–96, 1987.
14. Владимиров, В.В.; Волков, А.Ф.; Мейлихов, Е.З. *Плазма полупроводников*. М.: Атомиздат, 1979. 256 с.
15. Yu, P. Y.; Cardona, M., *Fundamentals of Semiconductors*. N.Y.: Springer, 2010. 775 p.
16. Бонч-Бруевич, В.Л.; Калашников, С.Г., *Физика полупроводников*. М.: Наука, 1990. 685 с.
17. Пожела, Ю.К., *Плазма и токовые неустойчивости в полупроводниках*. М.: Наука, 1977. 367 с.
18. Смит, Р., *Полупроводники*. Пер. с англ. под ред. Н.А.Пенина. М.: Мир, 1982. 558 с.
19. Витлина, Р. А.; Дыхне, А., “Отражение электромагнитных волн от поверхности с мелким рельефом,” *ЖЭТФ*, Т. 99, № 6, С. 1758–1771, 1991.
20. Пикус, Г.Е., *Основы теории полупроводниковых приборов*. М.: Наука, 1965. 448 с.
21. Викулин, И.М.; Стафеев, В.И., *Физика полупроводниковых приборов*. М.: Радио и связь, 1990. 263 с.
22. Гаман, В.И., *Физика полупроводниковых приборов*. Томск: Изд. НТЛ, 2000. 426 с.
23. Самарский, А.А.; Гулин, А.В., *Численные методы*. М.: Наука, 1989. 432 с.
24. Sadiku, M. N. O., *Numerical Techniques in Electromagnetics*, 2nd ed. N.Y.: CRC Press, 2000. 750 p.
25. Collin, R., *Field Theory of Guided Waves*. N.Y.: IEEE Press, 1991. 852 p.
26. Самарский, А.А., *Теория разностных схем*. М.: Наука, 1989. 616 с.
27. Gibbs, H. M., *Optical Bistability*. Orlando: Academic Press, 1985. 471 p.

Поступила в редакцию 07.07.2017