

А.С. Ташилов, М.Н. Барашев, Ю.П. Хапачев

**НОВЫЕ ПОДХОДЫ В ТЕХНОЛОГИИ
ОСОБО МОЩНЫХ ДИОДНЫХ СВЧ-ГЕНЕРАТОРОВ
МИЛЛИМЕТРОВОГО ДИАПАЗОНА**

НАЛЬЧИК 2007

МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ
ФЕДЕРАЛЬНОЕ АГЕНТСТВО ПО ОБРАЗОВАНИЮ
КАБАРДИНО-БАЛКАРСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ

А.С. Ташилов, М.Н. Барашев, Ю.П. Хапачев

**НОВЫЕ ПОДХОДЫ В ТЕХНОЛОГИИ
ОСОБО МОЩНЫХ ДИОДНЫХ СВЧ-ГЕНЕРАТОРОВ
МИЛЛИМЕТРОВОГО ДИАПАЗОНА**

НАЛЬЧИК 2007

УДК 621.382.2.029.64
ББК 32.85
Т 12

Рецензент:
доктор физико-математических наук
Е.Н. Овчинникова

Ташилов А.С., Барашев М.Н., Хапачев Ю.П.

Т 12. Новые подходы в технологии особо мощных диодных СВЧ-генераторов миллиметрового диапазона / Под ред. д.т.н., проф. Б.С. Карамурзова и д.ф.-м.н., проф. А.А. Дышекова. – Нальчик: Каб.-Балк. ун-т, 2007. – 60 с.

Монография посвящена способу изготовления особо мощных полупроводниковых СВЧ-мезодиодов миллиметрового диапазона, таких как ЛПД, диод Ганна и других, работающих в непрерывном и импульсном режимах. Для ЛПД мм-диапазона это позволило увеличить мощность питания в непрерывном режиме до 10 ватт и получить рекордную мощность СВЧ-генерации (1,04 ватт) на частоте 65,9 ГГц при рабочей температуре р-п-перехода 220 °С.

Область применения: полупроводниковая СВЧ микро- и нанoeлектроника.

ISBN 5-7558-0408-7

УДК 621.382.2.029.64
ББК 32.85

ISBN 5-7558-0408-7

© Кабардино-Балкарский
государственный университет, 2007

ПРЕДИСЛОВИЕ

Расширение сфер применения генераторов миллиметрового диапазона в различных коммуникационных, радиометрических и радарных системах связано с возможностью увеличения их выходной мощности. На сегодняшний день максимальные уровни выходной СВЧ-мощности твердотельных генераторов миллиметрового диапазона реализуются с помощью лавинно-пролетных диодов (ЛПД), выполненных с использованием алмазного теплоотвода. Характерно, что уровни выходной мощности, достигаемые при рабочей температуре перегрева р-п-перехода, значительно ниже уровня достигаемого при предельных уровнях питания. Монография отражает современное решение фундаментальной проблемы существенного снижения уровня тепловых ограничений для твердотельных генераторных и усилительных приборов СВЧ миллиметрового диапазона.

Известно, что для приборов этого класса, таких, как лавинно-пролетные диоды, диоды Ганна и другие, уровень выходной СВЧ-мощности в миллиметровом диапазоне ограничен не только электронными свойствами материала структуры, но и уровнем температуры перегрева активной области. Приборы данного класса имеют относительно низкий КПД, не превышающий в лучших образцах 10-15 %. Поэтому основная входная мощность преобразуется в тепловую энергию, вызывающую перегрев и тепловой пробой структуры. Тем более, что указанный класс приборов работает при самых высоких плотностях электрической мощности питания относительно других полупроводниковых приборов. Данная проблема усугубляется именно в миллиметровом диапазоне, что связано с уменьшением размеров активной структуры, а именно, – площади активных переходов и, соответственно, увеличением плотности входной электрической мощности.

Отсюда следует фундаментальная конструкторско-технологическая проблема исполнения известного класса приборов, таких, как ЛПД, диоды Ганна, в том виде, который позволит при тех же рабочих электрических нагрузках получить меньшую температуру перегрева активной структуры, либо при допустимом уровне температуры перегрева обеспечить больший уровень входной электрической мощности. Эти соображения определяют актуальность монографии.

Авторы поставили перед собой задачу найти конструкцию мезакристалла, позволяющую задавать на исходной пластине микроминиатюрную, вплоть до наноразмеров, рабочую геометрию активной структуры для работы в миллиметровом диапазоне и обеспечить соответствующую технологию,

позволяющую манипулировать этим мезокристаллом и монтировать его на теплоотвод. В процессе решения этой задачи впервые реализован интеграционный принцип, позволяющий объединить в конструкции кристалла функции инструмента и оснастки. Достигается это следующим образом. Активные элементы кристалла с рабочей геометрией объединяются с помощью соединений с технологическими элементами, выполняющими функцию инструмента и оснастки, которые после монтажа на теплоотвод удаляются. При этом активные элементы кристалла и их рабочая геометрия сохраняются. Существенно, что все перечисленные конструктивно-технологические элементы выполняются из материала активной структуры в монолите.

Решение технологической части задачи осуществлено авторами благодаря исследованию структурного совершенства материала активных элементов. В результате была выявлена связь между упруго-напряженным состоянием активной структуры и процентом выхода годных приборов.

Решение поставленных задач является принципиально новым, поскольку все известные способы изготовления данных приборов предполагают формирование рабочих размеров активной структуры уже после монтажа на теплоотвод, когда невозможно обеспечить конфигурацию кристалла с сильно развитой периферией контакта активной структуры к теплоотводу.

Следует отметить, что сведения за 2003-2005 гг., опубликованные ведущей в данной области фирмой NEC (www.datasheetarchive.com), показывают, что для кремниевых серийно выпускаемых ЛПД мм-диапазона уровень теплового сопротивления, достигнутого с использованием алмазного теплоотвода, лежит в пределах от 30 °C/Вт в 8 мм-диапазоне до 80 °C/Вт в 3 мм-диапазоне. Соответствующие уровни выходной мощности СВЧ-генерации от 0,8 Вт в 8 мм-диапазоне до 0,06 Вт в 3 мм-диапазоне.

В монографии показано, что для кремниевых ЛПД 5 мм-диапазона получено снижение теплового сопротивления без использования алмазного теплоотвода до уровня 20-25 °C/Вт, что обеспечивает возможность входного уровня непрерывной электрической мощности порядка 10 Вт и выходной непрерывной СВЧ-мощности около 1 Вт. При этом температура перегрева активной области прибора не превышает 200 °C. Таким образом, полученный результат существенно превосходит характеристики зарубежных современных серийно выпускаемых приборов.

Данная монография может быть использована в качестве учебного пособия для студентов старших курсов и аспирантов специальности "Твердотельная электроника, радиоэлектронные компоненты, микро- и нанoeлектроника, приборы на квантовых эффектах".

Доктор технических наук, профессор
Доктор физико-математических наук, профессор

Б.С. Карамурзов
А.А. Дышеков

Литература

1. Гассанов Л.Г., Липатов А.А., Марков В.В., Могильченко Н.А. Твердотельные устройства СВЧ в технике связи. – М.: Радио и связь, 1988. – 288 с.
2. Зи С. Физика полупроводниковых приборов. – М.: Мир, 1984. – Т. 2. – 456 с.
3. Тагер А.С. Предельные параметры полупроводниковых СВЧ приборов и их связь с характеристиками полупроводникового материала (обзор) // Известия Вузов СССР // Радиоэлектроника. – 1979. – Т. 22, № 10. – С. 5-16.
4. Тагер А.С. Перспективные направления полупроводниковой электроники СВЧ // Литовский физический сборник. – 1982. – Т. XXI, № 4. – С. 22-42.
5. Дышеков А.А., Ташилов А.С., Барашев М.Н., Багов А.Н. Проблемы в технологии особо мощных СВЧ диодов миллиметрового диапазона // Актуальные вопросы современного естествознания. Вып. 3. – Нальчик: Каб.-Балк. ун-т, 2005. – С. 68-71.
6. Ташилов А.С., Шекихачев А.М., Шухостанов А.К. Составные двухмезовые кремниевые лавинно-пролетные диоды 4 мм-диапазона длин волн // Электронная техника. Сер. Электроника СВЧ. – 1990. – Вып. 8 (432). – С. 27-29.
7. Шухостанов А.К., Ташилов А.С. Успехи в конструировании мощных кремниевых лавинно-пролетных диодов миллиметрового диапазона // Электронная промышленность. – 1992. – № 6. – С. 53-56.
8. Ташилов А.С., Барашев М.Н., Хапачев Ю.П. Связь структурных параметров с процентом выхода и качеством многомезовых кремниевых лавинно-пролетных диодов миллиметрового диапазона // Электронный журнал "Исследовано в России". – 2004. – Т. 168. – С. 1808-1814.
<http://zhurnal.ape.relern.ru/articles/2004/168.pdf>
9. Ташилов А.С., Барашев М.Н., Багов А.Н., Хапачев Ю.П. Структурные параметры и качество многомезовых кремниевых лавинно-пролетных диодов // II Украинская научная конференция по физике полупроводников (УНКФП-2) с участием зарубежных ученых: Материалы конференции. – Черновцы: Рута, 2004. – Т. 2. – С. 563.
10. Дышеков А.А., Хапачев Ю.П., Барашев М.Н., Багов А.Н. Определение деформаций в многослойных гетероструктурах // Актуальные вопросы современного естествознания. Вып. 4. – Нальчик: Каб.-Балк. ун-т, 2006. – С. 42-45.
11. Ташилов А.С., Барашев М.Н., Багов А.Н., Дышеков А.А., Хапачев Ю.П. Связь выхода годных многомезовых кремниевых лавинно-пролетных диодов миллиметрового диапазона со структурными параметрами // Поверхность. – 2007. – № 5. – С. 3-6.
12. Khapachev Yu.P., Dyshekov A.A., Tashilov A.S., Barashev M.N. The new approaches in a process engineering high power microwaves diodes millimeter wave band // Journal of Guangdong Non-Ferrous Metals. – 2005. – Vol. 15,

№ 2-3. – P. 545-547. Selected Proceedings of the 8-th Shinao-Russia Simposium on New Materials and technologies.

13. Молодкин В.Б., Шпак А.П., Дышеков А.А., Хапачев Ю.П. Динамическое рассеяние рентгеновского и синхротронного излучения в сверхрешетках. Рентгенодифракционная кристаллооптика сверхрешеток. – Киев: Академперіодика, 2004. – 121 с.

14. Ташилов А.С. Решение о выдаче патента на изобретение по заявке № 2004132118. "Способ изготовления СВЧ мезадиодов".

15. Каталог фирмы NEC 2003-2005 гг.

www.datasheetarchive.com/datasheet/pdf/3633.html.

16. Генкин В.И., Грачева Т.Г., Калякина Т.М. и др. Наивысшие параметры основных классов изделий электронной техники, достигнутые к 1988 г. // Зарубежная электронная техника. – 1988. – Вып. 7.

17. Heitzman M., Boudot B. New progress in the development of a 94 GHZ pretuned module silicon impatt diode // IEEE Trans. – 1983. – V. ED-30. – № 7.

18. Мощные IMPATT диоды для систем связи между спутниками // Экспресс-информация. ЦНИИ Электроника. – 1984. – Вып. 249 (3519) от 17.12.1984.

19. Yuan L., Melloch M.R, Cooper J.A., and Webb K.J. Silicon Carbide IMPATT Oscillators for High-Power Microwave and Millimeter-Wave Generation // IEEE/Cornell Conference on Advanced Concepts in High Speed Semiconductor Devices and Circuits. Ithaca. – NY. – August 7-9, 2000.

20. Байтч А.Т. Алмазные теплоотводы для твердотельных приборов // Зарубежная радиоэлектроника. – 1971. – № 6. – С. 142-147.

21. Снегирев В.П., Юхин А.Ф. и др. Лавинно-пролетный диод миллиметрового диапазона длин волн с алмазным теплоотводом // Электронная техника. Серия 1. Электроника СВЧ. – 1986. – Вып. 5 (389). – С. 41-46.

22. Данюшевский Ю.З. Тепловые ограничения мощности ЛПД и некоторые пути их преодоления // Теплообмен в электронных приборах. Межвузовский научный сборник. – 1976. – Вып. 4. – С. 3-15.

23. Бауэрс. СВЧ усилители на лавинно-пролетных диодах // Электроника. – 1972. – № 12.

24. Маломощный широкополосный неохлаждаемый предусилитель // AIAA Paper. – 1970. – № 419. (перевод ЭТ-8217).

25. Характеристики электронных генераторов на ЛПД и диодах Ганна и их использование в СВЧ системах // Microwave Journal. – 1970. – Т. 13, № 7. – С. 37-42.

26. Шредер, Хаддэд Г.Л. Влияние температуры на свойства IMPATT-диода. // ТИИЭР. – 1971. – № 8.

27. Michel J. et al. Разработка лавинных диодов // Acta Electronica. – 1969. – Т. 12, № 3. – С. 255-273.

28. Мартиросов Н.М. О лавинно-тепловом пробое р-п-перехода // Физика и техника полупроводников. – 1967. – Т. 1. – С. 1075.
29. Yomaguchi M., Ohmori M. Перепад температуры в кремниевых р-п-переходах ЛПД // Review of the Electrical Communication Lab. – 1971. – V. 19, № 9-10.
30. Berman R. Алмазы в роли теплоотвода // Electronic Engineering. – 1970. – Vol. 42, № 510. – Р. 43-45.
31. Вавилов В.С., Конорова Е.А. Алмазы в электронике // Вестник АН СССР. – 1973. – № 8.
32. Алмаз как теплоотводящий материал: Информация // Электронная техника. Сер. 1. Электроника СВЧ. – 1972. – Вып. 9. – С. 133.
33. Блейвас И.М., Жбанов А.И., Кошелев В.С., Шевцов В.Н. Универсальная программа решения двухмерной стационарной задачи теплопроводности для узлов электронных приборов // Электронная техника. Сер. 1. Электроника СВЧ. – 1980. – Вып. 12 (324). – С. 61.
34. Тагер А.С., Вальд-Перлов В.М. Лавинно-пролетные диоды и их применение в технике СВЧ. – М.: Советское радио, 1968.
35. Heitz R.H., Stover H.L., Tolar N.J. A method for heatflow resistance measurements in avalanche diodes // IEEE Trans. Electron Devices. – 1969. – Vol. 16. – Р. 438-444.
36. Heitz R.H. Неоднородная тепловая проводимость в СВЧ-генераторах на ЛПД // IEEE Trans. on ED. – 1968. – Vol. 15, № 6. – Р. 350-361.
37. Gibbons G., Misawa T. Распределение температуры и тока в р-п-переходе при лавинном пробое // Solid St. Elect. – 1968. – Vol. 11, № 11. – Р. 1007-1014.
38. Дульнев Г.Н., Семяшкин Э.М. Теплообмен в радиоэлектронных аппаратах. – Л.: Энергия, 1968.
39. Garlinger E.D., Stover H.L. Тепловое сопротивление диода с кольцевой геометрией // IEEE Trans. on ED. – 1970. – Vol. ED-17. – Р. 482-484.
40. Мариначчо Л.П. Лавинно-пролетные генераторные диоды кольцевой геометрии // ТИИЭР. – 1968. – Т. 56, № 7.
41. Кулаков М.В., Макаров Б.Н. Измерение температуры поверхности твердых тел. – М.: Энергия, 1969.
42. Ярышев И.А. Влияние отвода тепла по датчику на точность измерения температуры поверхности // Изв. ВУЗов. Приборостроение. – 1963. – Т. 6, № 1.
43. Мариначчо Л.П. Составные IMPATT-диоды, генерирующие на частоте 110 GHz // ТИИЭР. – 1971. – Т. 59, № 1. – С. 101-102.
44. Misawa T. and Marinaccio L.P. 100 GHz Si IMPATT diodes for (0,1 Watt) CW operations // Представлен на симпозиуме по субмиллиметровым волнам. – NY, 1970.

45. Edwards R., Ciccolella D.F., Misawa T., Iglesias D.E., and Decker V. Millimeter wave silicon IMPATT devices // Представлен на ежегодной конференции по электронике ИИЭР. – Вашингтон, 1969.
46. Swan C.B., Misawa T., and Marinaccio L.P. Composite avalanche diode structures for increased power capability. // IEEE Trans. – Electron Devices. – 1967. – Vol. ED-14. – P. 584-589.
47. Haitz R.H. Nonuniform thermal conductance in avalanche microwave oscillators // IEEE Trans. Electron Device. – 1968. – Vol. ED-15. – P. 350-361.
48. De Loach B.C. Jr. Thin skin IMPATTs // IEEE Trans. Microwave Theory Tech (Correspondence). – 1970. – Vol. MTT-18. – P. 72-74.
49. Алферов Ж.И. Гетероструктуры и их применение в оптоэлектронике // Вестник АН СССР. – 1976. – Вып. 7. – С. 28-40.
50. Валиев К.А. Микроэлектроника и пути развития. – М.: Наука, 1986. – 142 с.
51. Мильвидский М.Г. Полупроводниковые материалы в современной электронике. – М.: Наука, 1986. – 144 с.
52. Алферов Ж.И. История и будущее полупроводниковых гетероструктур // ФТП. – 1998. – Т. 32, № 1. – С. 3-18.
53. Мильвидский М.Г., Освенский В.Б. Закономерности дефектообразования в гетероэпитаксиальных структурах соединений A^3B^5 для оптоэлектроники // Кристаллография. – 1977. – Т. 22. – Вып. 2. – С. 431-447.
54. Броудай И., Мерей Дж. Физические основы микротехнологии / Пер. с англ. – М.: Мир, 1985. – 494 с.
55. Суэмацу Я., Араи С. Интегрально-оптический подход к разработке перспективных полупроводниковых лазеров // ТИИЭР. – 1987. – Т. 75, № 11. – С. 38-55.
56. Форрест С.Р. Оптоэлектронные интегральные схемы // ТИИЭР. – 1987. – Т. 75, № 11. – С. 55-65.
57. Тхорик Ю.А., Хазан Л.С. Пластическая деформация и дислокации несоответствия в гетероэпитаксиальных системах. – Киев: Наукова думка, 1983. – 304 с.
58. Чернов А.А. Процессы кристаллизации // Современная кристаллография. – М.: Наука, 1980. – Т. 3. – С. 7-232.
59. Kavanagh K.L., Capano M.A., Hobbs L.W. Asymmetrical in dislocation densities, surface morphology? and strain of GaInAs/GaAs singl heterolayers // J. Appl. Phys. – 1988. – Vol. 64, № 10. – P. 4843-4852.
60. Хапачев Ю.П., Чуховский Ф.Н. Развитие рентгенодифрактометрического метода определения деформаций, напряжений и несоответствия в гетероструктурах // Методы структурного анализа. – М.: Наука, 1989. – С. 188-204.
61. Хапачев Ю.П., Чуховский Ф.Н. Деформации и напряжения в многослойных эпитаксиальных кристаллических структурах. Рентгенодифракционные методы их определения // Кристаллография. – 1989. – Т. 34. – Вып. 3. – С. 776-800.

62. Chukhovskii F.N., Khapachev Yu.P. X-Ray Diffraction Methods for Determination of Stresses and Strains in Multilayer Monocrystal Films // *Crystallography Reviews*. – 1993. – Vol. 3. – P. 257-328.
63. Бушуев В.А., Кютт Р.Н., Хапачев Ю.П. Физические принципы рентгенодифрактометрического определения параметров реальной структуры многослойных эпитаксиальных пленок / Под ред. Ю.П. Хапачева. – Нальчик: Каб-Балк. ун-т, 1996. –186 с.
64. Устинов В.М., Захаров Б.Г. Макронапряжения в эпитаксиальных структурах на основе соединений $A^{III}B^V$ // *Обзоры по электронной технике*. Сер. 6. – 1977. – Вып. 4 (492). – 34 с.
65. Ishida K., Matsui J., Kamejima T., Sakuma I. X-ray Study of AlGaAs Epitaxial Layers // *phys. stat. sol. (a)*. – 1975. – Vol. 31, № 1. – P. 255-262.
66. Cohen B.G., Focht M.W. X-Ray measurement of Elastic strain and annealing in Semicinductors // *Solid state Electronics*. – 1970. – Vol. 13, № 1. – P. 105-112.
67. Арсентьев И.Н, Берт Н.А., Конников С.Г., Уманский В.Е. Определение упругих напряжений в гетероструктурах методом широкорасходящегося пучка рентгеновских лучей // *ФТП*. – 1980. – Т. 14. – Вып. 1. – С. 96-100.
68. Олсен Г.Х., Эттенберг М. Особенности получения гетероэпитаксиальных структур $A^{III}B^V$ // *Рост кристаллов*. – М.: Мир, 1981. – Вып. 2. – С. 9-79.
69. Segmuller A. Characterization of Epitaxial Films by X-Ray Diffraction // *Advances in X-Ray Analysis*. New-York and London: Plenum Press. – 1986. – Vol. 29. – P. 352.
70. Ortner B. Simultaneous Determination of the Lattice Constant and Elastic Strain in Cubic Single Crystal // *Advances in X-Ray Analysis*. New-York and London: Plenum Press. – 1986. – Vol. 29. – P. 387.
71. Osbourn G.C. Electeonice structure of GaAsP/GaP strained-layer superlattices with $X<0,5$ // *J. Vac. Sci. Technol.* – 1982. – Vol. 21, № 2. – P. 469-472.
72. Matthews J.W., Blakeslee A.E. Defects in Epitaxial Multilayers // *J. of Cryst. Growth*. – 1974. – Vol. 27, № 1. – P. 118-125.
73. Bean J.C., Feldman L.C., Fiory A.T. et al. Ge_xSi_{1-x}/Si strained-layer superlattice grown by molecular beam epitaxy // *J. Vac. Sci. Technol.* – 1984. – Vol. A2. – P. 436-438.
74. Елюхин В.А., Сорокина Л.П. Энергия внутренней деформации и возможность упорядочения в твердых растворах $A_x^3B_{1-x}^3C^5$ // *Доклады АН СССР*. – 1986. – Т. 287, № 6. – С. 1384-1386.
75. Eisele H., Haddad G.I. Enhanced Performance in GaAs TUNNETT Diode Oscillators Above 100 GHz Through Diamond Heat Sinking and Power Combining // *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*. – 1994. – MTT-42(12). – P. 2498-2503.
76. Eisele H. Selective Etching Technology for 94 GHz GaAs IMPATT Diodes on Diamond Heat Sinks // *Solid-State Electronics*. – 1989. – 32(3). – P. 253-257.

77. Eisele H., Haddad G.I. GaAs TUNNETT Diodes on Diamond Heat Sinks for 100 GHz and Above // IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques. 1995. MTT-43(1) P. 210-213.
78. Eisele H., Haddad G.I. Two-Terminal Millimeter-Wave Sources // IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques. – 1998. – MTT-46(6). – P. 739-746.
79. Хрусталеv А.В., Захаров А.П. Влияние схемы параллельного соединения мезаструктур на возбуждение двухэлементного ЛПД // Электронная техника. Серия 2. Полупроводниковые приборы. – 1980. – Вып. 4 (139). – С. 13-19.
80. Наливайко Б.А., Берлин А.С., Башков В.Г. и др. Полупроводниковые приборы. Сверхвысокочастотные диоды. Справочник / Под ред. Б.А. Наливайко. – Томск, 1992. – 223 с.
81. Kramer N.B. Solid state technology for millimeter waves // J. Microwave. – 1978. – Vol. 21, № 8. – P. 57-61.
82. Кейси Х., Паниш М. Лазеры на гетероструктурах. Материалы. Рабочие характеристики. – М.: Мир, 1981. – Т. 2. – 365 с.
83. Кузнецов Г.Ф., Семилетов С.А. Дифракционные методы неразрушающего контроля реальной структуры эпитаксиальных пленок в микроэлектронике // ЦНИИ "Электроника". – 1975. – С. 94.
84. Гинье А. Рентгенография кристаллов. – М.: ГИФМЛ, 1961. – 420 с.
85. Боуэн Д.К., Таннер Б.К. Высокора разрешающая рентгеновская дифрактометрия. – СПб.: Наука, 2002. – 275 с.
86. Бессолов В.Н., Именков А.Н., Конников С.Г. и др. Квантовая эффективность пластически деформированных варизонных $\text{Ga}_{1-x}\text{Al}_x\text{P}$ // ФТП. – 1983. – Т. 13. – Вып. 12. – С. 2173-2176.
87. Уманский В.Е., Конников С.Г., Гарбузов Д.З. и др. Влияние несоответствия постоянных решетки на квантовый выход излучательной рекомбинации гетероструктур // ФТП. – 1982. – Т. 16. – Вып. 8. – С. 1496-1499.
88. Konnikov S.G. et al. The Influence of Lattice Mismatch upon Defects Generation and Luminescent Characteristics of Heterostructures in the GaP-InP System // Cryst. Research and Technol. – 1981. – Vol. 16, № 2. – P. 169-174.
89. Klokholm E. et al. Epitaxial strains and fracture in garnet films // Magnetism and Magnetic Materials. 1971. AIP Conf. Proc. 5. American Institute of Physics. – NY, 1972. – Part 1. – P. 105-109.
90. Берт Н.А., Гореленок А.Т., Конников С.Г. и др. Экспериментальное определение различия коэффициентов термического расширения в гетероструктурах // ЖТФ. – 1981. – Т. 51. – Вып. 8. – С. 1018-1020.
91. Konnikov S.G., Umansky V.E. Energy Band-Gap in Elastic-strained Heteroepitaxial Layers // Cryst. Res. Technol. – 1985. – Vol. 20, № 10. – P. 1381-1386.
92. Елюхин В.А., Кочарян В.Р., Портной В.Л., Рывкин Б.С. Особенности генерации когерентного излучения в гетероструктурах с плавным волновым слоем // Письма в ЖТФ. – 1980. – Т. 6. – Вып. 4. – С. 244-246.

93. Ахмедов Д., Бежан Н.П., Берг Н.А. Влияние внутренних деформаций на поляризацию излучения в гетеролазерных структурах In-InGaAsP // Письма в ЖТФ. – 1980. – Т. 6. – Вып. 12. – С. 705-708.
94. Брагинская Б.Г., Елюхин В.А., Кучинский В.И. и др. Особенности поляризации когерентного излучения, генерируемого в многослойных гетероструктурах // ЖТФ. – 1983. – Т. 53, № 9. – С. 1843-1845.
95. Хапачев Ю.П., Дышеков А.А., Чуховский Ф.Н., Филиппченко В.Я. Рентгенодифракционный способ определения деформаций. А.С. № 1311398. Зарегистрировано 15.01.1987.
96. Хапачев Ю.П., Дышеков А.А., Галушко М.А., Чуховский Ф.Н. Рентгенодифракционный способ определения деформаций. А.С. № 146480. Зарегистрировано 8.11.1988.
97. Дышеков А.А., Хапачев Ю.П. Рентгенодифрактометрическое определение упругих напряжений и несоответствия в многослойных эпитаксиальных пленках // Металлофизика. – 1986. – Т. 8, № 6. – С. 15-22.
98. Афанасьев А.М., Александров П.А., Имамов Р.М. Рентгеновская структурная диагностика в исследовании приповерхностных слоев монокристаллов. – М.: Наука, 1986. – 95 с.
99. Петрашень П.В. Рентгеновское диффузное рассеяние в кристаллах со слоистой неоднородностью. I. Уравнения для амплитуд // Металлофизика. – 1986. – Т. 8, № 1. – С. 35-43.
100. Петрашень П.В., Чуховский Ф.Н. II. Анализ распределения интенсивностей // Металлофизика. – 1986. – Т. 8, № 3. – С. 45-51.
101. Петрашень П.В., Разумовский А.Ю. Положительное решение на изобретение № 3940493 от 11.06.86.
102. Анализ поверхности методами Оже-рентгеновской фотоэлектронной спектроскопии / Под ред. Д. Бригса и М.П. Сиха. – М.: Мир, 1987. – 432 с.
103. Электронная и ионная спектроскопия твердых тел / Под ред. Л. Фирменса. – М.: Мир, 1981. – 352 с.
104. Хапачев Ю.П., Шухостанов А.К., Дышеков А.А., Барашев М.Н., Оранова Т.И. Рентгенодифракционный способ определения характеристик эпитаксиальных структур. А.С. № 1526383. Зарегистрировано 01.09.1989.
105. Хапачев Ю.П., Барашев М.Н., Шухостанов А.К., Чуховский Ф.Н. Рентгенодифракционный способ определения градиента деформации неоднородных по составу монокристаллических пленочных образцов. А.С. № 1629753. Зарегистрировано 22.10.1990. Опубликовано 23.02.1991. Бюл. № 7.
106. Лидер В.В., Чуховский Ф.Н., Хапачев Ю.П., Барашев М.Н. Рентгенодифрактометрическое исследование нарушенных приповерхностных слоев Si(111) и InGaP/GaAs(111) на основе модели постоянного градиента деформации // ФТТ. – 1989. – Т. 31. – Вып. 4. – С. 74-81.

107. Барашев М.Н., Лидер В.В., Хапачев Ю.П. Рентгенодифрактометрическое определение статического фактора Дебая-Валлера в пленках с градиентом состава // II Межреспубликанский семинар: Современные методы и аппаратура рентгеновских дифрактометрических исследований материалов в особых условиях. Тезисы докладов. – Киев, 1991. – С. 70.

108. Бушуев В.А., Хапачев Ю.П., Лидер В.В. Исследование поверхностной неоднородности деформации в эпитаксиальной структуре $\text{In}_{1-x}\text{Ga}_x\text{P}/(111)\text{GaAs}$ // Письма в ЖТФ. – 1993. – Т. 19. – Вып. 23. – С. 74-78.

109. Хапачев Ю.П., Оранова Т.И., Багов А.Н., Дышеков А.А. Отчет о НИР. № ГР-01.88.0090371. Разработка специальных рентгенодифракционных методик контроля ЛПД. – Нальчик: Каб.-Балк. ун-т, 1988.

110. Кютт Р.Н., Улин В.П., Дышеков А.А., Хапачев Ю.П. Идентификация гексагональной фазы в эпитаксиальной системе $\text{GaP}/\text{Zn}(\text{Mg})\text{S}$ // ЖТФ. – 1996. – Т. 66. – Вып. 12. – С. 39-47.

111. Кютт Р.Н., Елюхин В.А., Хапачев Ю.П. Рентгенодифрактометрическое исследование гексагональной модификации GaP // Поверхность. – 2001. – № 6. – С. 12-15.

112. Галушко М.А., Дышеков А.А., Хапачев Ю.П. Влияние пластической деформации подложки на профиль напряжений и критическую толщину эпитаксиальной пленки // Металлофизика. – 1993. – Т. 15, № 5. – С. 71-79.

113. Молодкин В.Б., Низкова А.И., Шпак А.П., Мачулин В.Ф., Кладько В.П., Прокопенко И.В., Кютт Р.Н., Кисловский Е.Н., Олиховский С.И., Первак Е.В., Фодчук И.М., Дышеков А.А., Хапачев Ю.П. Дифрактометрия наноразмерных дефектов и гетерослоев кристаллов. – Киев: Академперіодика, 2005. – 388 с.

Оглавление

Предисловие	3
Введение	5
Глава 1. Тепловые ограничения генераторных СВЧ-диодов.	
Современное состояние проблемы	7
1.1. Проблема тепловых ограничений мощности	7
1.2. ЛПД с алмазным теплоотводом	10
1.3. Структуры с развитой периферией	15
Глава 2. Новые конструктивно-технологические решения теплоотво-	
да мощных СВЧ-мезадиодов	24
2.1. Минимизация высоты мезакристалла	24
2.2. Двухмезовый ЛПД 4 мм-диапазона	27
2.3. Новые подходы в технологии изготовления ЛПД с развитой	
периферией активной структуры	30
2.4. Реализация технологии многомезового ЛПД	36
2.5. Рентгенодифракционный контроль эпитаксиальных слоев	
кремния	43
2.5.1. Влияние структурных параметров материала на технические	
характеристики приборов	43
2.5.2. Результаты рентгенотопографического и рентгенодифрак-	
тометрического исследования пластин кремния	45
2.5.3. Связь структурных параметров с процентом выхода и каче-	
ством многомезовых кремниевых ЛПД миллиметрового	
диапазона	46
Заключение	50
Литература	51

НАУЧНОЕ ИЗДАНИЕ

Ташилов Аслан Султанович
Барашев Матвей Нестерович
Хапачев Юрий Пшиканович

**НОВЫЕ ПОДХОДЫ В ТЕХНОЛОГИИ
ОСОБО МОЩНЫХ ДИОДНЫХ СВЧ-ГЕНЕРАТОРОВ
МИЛЛИМЕТРОВОГО ДИАПАЗОНА**

Редактор *Л.П. Кербиева*
Компьютерная верстка *В.Н. Мидовой*
Корректор *Е.А. Балова*

В печать 04.09.2007. Формат 60х84 $\frac{1}{16}$.
Печать трафаретная. Бумага офсетная. 3.49 усл.п.л. 3.5 уч.-изд.л.
Тираж 100 экз. Заказ № 5226.
Кабардино-Балкарский государственный университет.
360004, г. Нальчик, ул. Чернышевского, 173

Полиграфический участок ИПЦ КБГУ
360004, г. Нальчик, ул. Чернышевского, 173.