

УДК 621.317.37

## ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ЭЛЕКТРОДИНАМИЧЕСКОЙ СИСТЕМЫ ПОЛУПРОВОДНИКОВОГО МАЗЕРА НА ЦИКЛОТРОННОМ РЕЗОНАНСЕ

*А. А. Вертуй, И. В. Иванченко, С. В. Кошечая,  
О. Д. Пустыльник, В. П. Шестопапов*

На частоте 75,4 ГГц проведены экспериментальные исследования двухзеркального квазиоптического резонатора — колебательного контура полупроводникового мазера на циклотронном резонансе. Изучены спектральные характеристики резонансной системы при различных ориентациях щели с активным полупроводником на плоском зеркале относительно электрического вектора возбуждающего поля. Предложен и исследован открытый резонатор с астигматическим зеркалом. В результате измерений на резонансном квазиоптическом поляриметре показано, что собственное электромагнитное поле резонансной ячейки генераторного прибора эллиптически поляризовано.

В настоящее время весьма актуальным является создание твердотельного генераторного прибора в коротковолновой части СВЧ диапазона. Одним из возможных путей решения этой задачи является использование так называемой циклотронной неустойчивости, которая проявляется у полупроводников с нестандартным законом дисперсии энергии для электронов проводимости. Впервые на возможность такого процесса указано в [1]. Теоретически эта неустойчивость исследовалась в работах [2, 3]. Однако до сих пор экспериментально она не наблюдалась. Такая ситуация связана, в основном, с целым рядом трудностей проведения эксперимента. Прежде всего — с выбором материала для активного элемента и резонансной системы.

В работе [1] указывалось, что наиболее пригодными для экспериментального изучения этого эффекта являются полупроводниковые соединения типа  $A_{III}B_V$ , например  $InSb$ , где в зоне проводимости имеется глубокий минимум при  $k=0$ . В  $n-InSb$  с минимальным содержанием примесей ( $\leq 10^{14} \text{ см}^{-3}$ ) время релаксации электронов максимально при температуре  $T \sim 20 \div 60 \text{ К}$  и составляет  $\tau \leq 10^{-12} \text{ с}$ . Оценки времени релаксации (параметра соударений) показывают, что в  $n-InSb$  неустойчивость может проявляться на частотах  $\omega > 10^{12} \text{ Гц}$ .

Таким образом, в реальных кристаллах генерация индуцированного излучения должна наблюдаться в той части СВЧ диапазона, где возможности регистрации малых уровней мощности ( $P < 10^{-9} \text{ Вт}$ ) ограничены. Это, в свою очередь, представляет жесткие требования к согласованию активного элемента с трактом канализации СВЧ сигнала.

Другой проблемой является выбор резонансной системы, оптимизирующей стартовые условия для генератора. В работе [1] указывалось, что эксперименты целесообразно проводить в квазиоптическом резонаторе. При этом обеспечиваются оптимальные в данной области спектра электромагнитных волн условия для функционирования прибора. Как известно, в вакуумной электронике открытые резонаторы

(ОР) зарекомендовали себя одной из наиболее эффективных электродинамических систем при создании мощных СВЧ генераторов, использующих эффект индуцированного циклотронного излучения электронов [4].

Целью настоящей работы является экспериментальное исследование собственного спектра и пространственной структуры электромагнитного поля двухзеркального ОР, который используется в качестве системы, обеспечивающей стабилизацию частоты генерации полупроводникового лазера на циклотронном резонансе (МЦР).

Одна из проблем, возникающая при таком применении ОР, заключается в сопряжении электромагнитных полей пускового резонатора и резонатора с расположенным в его объеме активным элементом. Однако до сих пор при рассмотрении вопроса согласования полей ограничивались изучением их пространственных амплитудных распределений. При этом предполагалось (по-видимому, не всегда верно), что поле излучателя — активного элемента — и поле резонатора линейно поляризованы. Другими словами, задача сводилась к обеспечению максимально достижимой для данной геометрии ОР концентрации резонансного поля в области расположения активного элемента.

Исследуемая квазиоптическая резонансная система (см. рис. 1) состоит из сферического 5 и плоского 6 зеркал. Активный полупроводниковый элемент 7 помещен в щели плоского зеркала. Поскольку в реальном генераторном приборе ОР находится во внешнем магнито-

статическом поле, направление которого совпадает с его осью, то поляризация поля излучателя приближается к круговой. Следовательно, возникает естественный вопрос — как согласована поляризация этого поля с собственной поляризацией резонансного поля, которая определяется геометрией ОР, и какие факторы в такой ситуации оказывают на поле наибольшее влияние? Естественно, что при этом необходимо также исследовать спектральные характеристики поля резонатора.

При выборе метода исследования мы руководствовались следующими соображениями. Во-первых, изучаемый ОР содержит один элемент связи, что не позволяет проводить измерения характеристик резонатора в проходном режиме его работы. Во-вторых, для исследования поляризационных свойств ОР необходимо, чтобы источник линейно-поляризованного возбуждающего поля мог произвольным образом ориентироваться относительно щели в плоском зеркале.

Учитывая это, связь резонансного поля с системой регистрации осуществлялась посредством металлической сферы радиуса  $r \sim 0,1\lambda$ , помещенной в пучности электрического поля стоячей волны на оси ОР. Наличие такого шарика в резонаторе приводит к образованию электрического диполя, который излучает в свободное пространство [5]. Это излучение и регистрируется приемной антенной в виде рупора или открытого конца волновода.

Блок-схема установки, реализующей описанный метод исследования ОР, приведена на рис. 1. Принцип ее работы заключается в следующем.

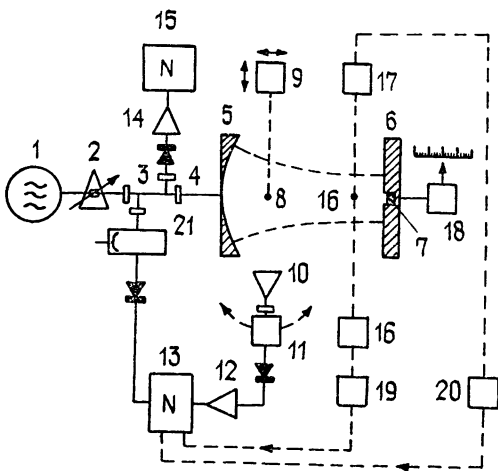


Рис. 1.

СВЧ сигнал генератора дифракционного излучения 1 с нестабильностью  $\delta\omega/\omega \sim 10^{-6}$  [6] через развязывающий аттенуатор 2 (затухание приблизительно 8 дБ) поступает в основной канал, в котором находится исследуемый ОР. Связь волноведущего СВЧ тракта с ОР осуществляется с помощью волноводной щели связи в центре сферического зеркала 5. Настройка ОР в резонанс производится путем плавного перемещения плоского зеркала 6 с точностью отсчета 0,5 мкм. Рассеивающий зонд 8 (диаметр приблизительно равен  $0,1\lambda$ ) крепится на тонкой нейлоновой нити, раскрепленной на рамке устройства перемещения 9, имеющего три степени свободы. Приемная рупорная антенна 10 устанавливается на поворотном устройстве 11. С помощью устройств перемещения 9 и 11 осуществляется настройка на максимальный сигнал, принимаемый рупорной антенной, в зависимости от возбужденной моды в ОР. При этом наличие резонанса в ОР (по мере его перестройки) контролируется индикатором 15 по изменению отраженного от ОР СВЧ сигнала. На рис. 2 а, б приведены спектры ОР:

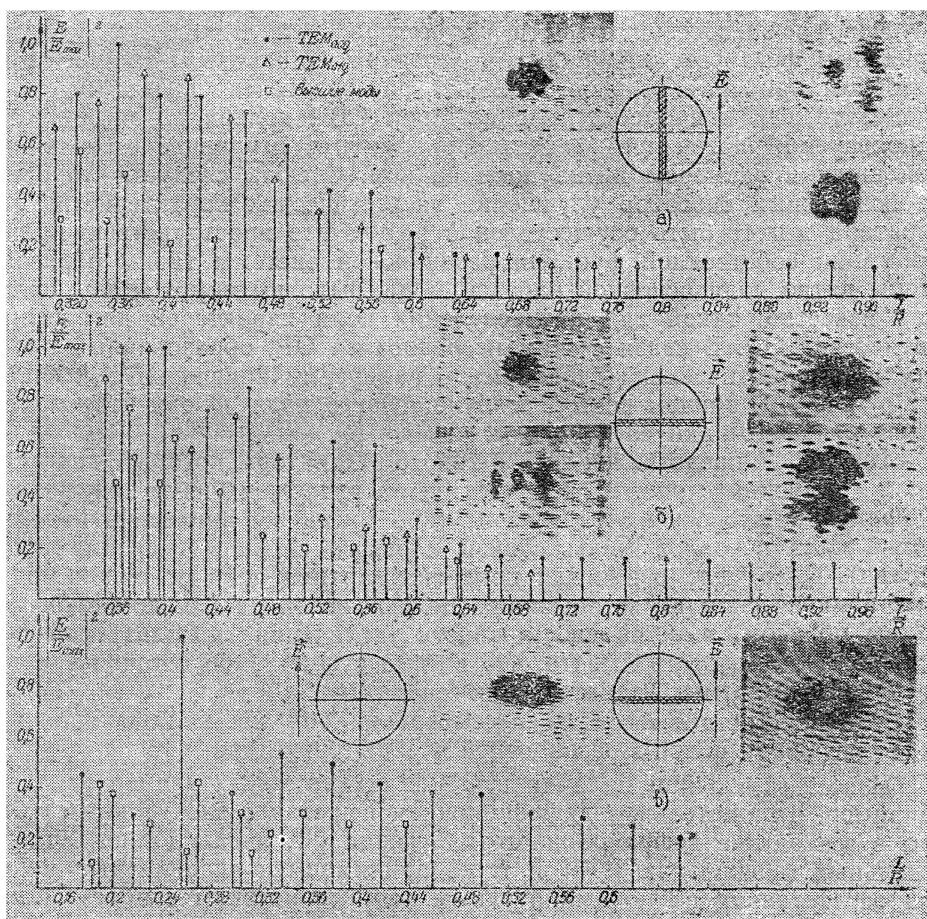


Рис. 2.

при ориентации щели на плоском зеркале в  $E$ - (рис. 2а) и  $H$ -плоскостях (рис. 2б). Анализ модового состава в этих двух случаях показывает, что спектры остаются практически одинаковыми. Имеет место незначительное сгущение спектра на рис. 2б из-за расщепления местно-вырожденных мод вследствие увеличения возмущающего действия щели на данной поляризации. В результате наблюдается некоторый

частотный сдвиг двух спектров. Это обстоятельство позволяет считать щель в зеркале ОР поляризационной неоднородностью.

Получение изображения распределения интенсивности возбуждаемых мод в объеме ОР проводилось известным методом визуализации [7] посредством сканирования поглощающим сферическим зондом 16 (диаметр равен 0,15λ) исследуемой области резонансного поля вблизи плоского зеркала. Движение зонда было синхронизировано с движением луча ЭЛТ осциллографа 13 с длительным послесвечением при помощи потенциометрических датчиков 19 и 20. Сканирующее устройство 17 обеспечило движение зонда по траектории строчной развертки с шагом по вертикали 0,5 мм.

На рис. 2 приведены изображения полей для двух ориентаций щели на плоском зеркале относительно вектора возбуждающего электрического поля  $E$ . Хорошо видно возмущающее действие щели на основной и высших модах. Таким образом, в спектре ОР доминирует основная мода с несколько деформированной пространственной структурой поля. Поле ее обладает максимальной интенсивностью и сосредоточено в близосевой области резонатора, что и является благоприятным фактором для работы генератора. Однако в реальном генераторном приборе активный элемент рассредоточен вдоль щели и, следовательно, в процессе генерирования СВЧ колебаний эффективно используемая поверхность активного элемента ограничивается шириной щели и размером пятна поля на нем. Отсюда следует, что один из возможных способов улучшения энергетических характеристик генератора может быть осуществлен в результате пространственной деформации собственной функции резонансной системы таким образом, чтобы пятно поля основной рабочей моды было вытянуто вдоль щели. Как известно, такой вид распределения поля характерен для астигматических ОР. В связи с этим исследовался ОР, образованный плоским и астигматическим зеркалами с радиусами кривизны  $R_1=60$  мм и  $R_2=200$  мм, причем вектор возбуждающего поля  $E$  ориентировался вдоль меньшего радиуса кривизны.

На рис. 2в представлен спектр такого резонатора, который, как видно из сравнения с рис. 2а, б, существенно разрежен из-за ощутимых дифракционных потерь для высших мод. Здесь же приведено изображение поля основной моды вблизи плоского зеркала (картина поля справа). Слева для сравнения показана картина поля основной моды в астигматическом ОР с обычной щелью связи на плоском зеркале. Таким образом, имеется возможность увеличения используемой поверхности активного элемента, что весьма существенно с точки зрения улучшения выходных характеристик генератора.

Наконец, остановимся на рассмотрении вопроса поляризационного согласования полей в резонансной ячейке генератора.

Известно, что при наличии в ОР таких активных элементов, как, например, отражательная дифракционная решетка с электронным пучком в генераторе дифракционного излучения [8], диоды Ганна в твердотельных генераторах [9, 10] и т. д., принимаются специальные меры для согласования их по амплитудным характеристикам с полем резонатора в предположении линейных поляризаций полей излучателя и собственно ОР. В данном случае исследуемая электродинамическая система представляет собой двухзеркальный ОР с внутренней локальной неоднородностью в виде диаметральной щели шириной 0,05λ на плоском зеркале, частично заполненной активным элементом. Для изучения такого ОР был применен резонансный квазиоптический поляриметр [11]. Состояние поляризации резонансного поля контролировалось в области изотропного по поляризации возбуждающего зонда, помещенного в оси ОР. Вывод энергии из резонатора осуществлял-

ся посредством также изотропного по поляризации элемента связи в центре сферического зеркала. Предварительная калибровка по линейно-поляризованному полю проводилась с помощью ОР с гладким плоским зеркалом. Затем измерялась поляризация электромагнитного поля резонансной системы в зависимости от ориентации щели относительно вектора возбуждающего поля. В дальнейшем при изменении ориентации щели наблюдалось незначительное вращение плоскости поляризации резонансного поля и трансформация линейно-поляризованного поля в эллиптически поляризованное.

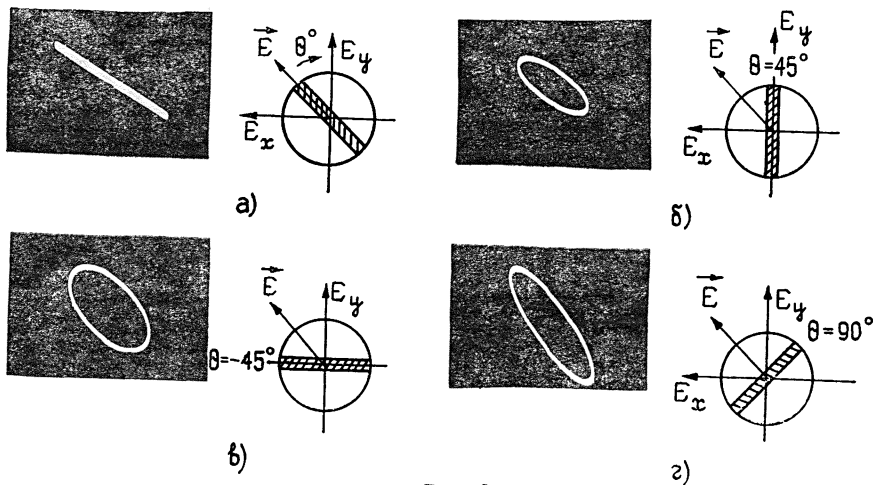


Рис. 3.

На рис. 3а, б, в приведены поляризационные эллипсы, соответствующие собственным поляризациям поля ОР для углов поворота щели относительно вектора  $E$   $\theta_1=0^\circ$ ,  $\theta_2=45^\circ$ ,  $\theta_3=-45^\circ$ . При этом относительный фазовый сдвиг между ортогональными компонентами поля составлял  $\varphi_1=0^\circ$ ,  $\varphi_2=-42^\circ$ ,  $\varphi_3=58^\circ$  соответственно при ширине щели  $h=0,05\lambda$  на частоте  $75,4$  ГГц. В случае ортогональной ориентации щели относительно вектора  $E$ , соответствующей реальной геометрии генератора, фазовый сдвиг  $\varphi_0=34^\circ$  (см. рис. 3г). Этот факт свидетельствует о том, что при выводе СВЧ энергии из генератора с помощью волноводной щели связи часть запасенной в объеме ОР энергии не попадает в нагрузку.

Так как используемый в генераторе циклотронный эффект обеспечивает близкую к круговой поляризацию излучения с соответствующим направлением вращения вектора  $E$  в зависимости от взаимной ориентации приложенных электрических и магнитных статических полей, то для согласования полей по поляризации необходимо обеспечивать собственную круговую поляризацию поля ОР. Проведенные исследования показывают, что одним из параметров, по которому следует проводить оптимизацию резонансной электродинамической системы, является величина  $h/\lambda$ . В частности, при  $h=0,065\lambda$  фазовый сдвиг между ортогональными компонентами поля уменьшается и составляет  $\varphi_0=20^\circ$ . Другим параметром, влияющим на собственную поляризацию поля ОР, является величина выступа, образованного активным элементом с поверхностью плоского зеркала.

Таким образом, в результате проведенной работы по исследованию основных характеристик резонансной ячейки полупроводникового МЦР могут быть сделаны следующие выводы и выработан ряд практических рекомендаций:

1) Наиболее благоприятным рабочим участком спектра является интервал расстояний между зеркалами  $0,3 < L/R < 0,57$ . При  $L/R > 0,57$

наблюдается резкое уменьшение добротности и интенсивности возбуждаемых резонансных мод вследствие увеличения дифракционных потерь системы. При  $L/R < 0,3$  спектр колебаний сгущается и сопровождается перекачкой энергии из-за ощутимого межмодового взаимодействия.

2) Увеличение эффективно используемой поверхности активного элемента достигается применением астигматической геометрии резонатора.

3) Показано, что в общем случае собственное электромагнитное поле в ОР генератора МЦР эллиптически поляризовано.

4) Вывод энергии из резонансного объема необходимо осуществлять с помощью изотропного по поляризации элемента связи для выделения сигналов на двух ортогональных поляризациях с их последующей фазировкой.

#### ЛИТЕРАТУРА

- 1 Тагер А. С — Письма в ЖЭТФ, 1966, 3, № 9, с 369
2. Калмыков А. И., Коцаренко Н. Я., Кошечая С. В.— Изв. вузов — Радиоэлектроника, 1975, 18, № 5, с. 93.
3. Калмыков А. И., Коцаренко Н. Я., Кошечая С. В.— Радиотехника и электроника, 1976, 21, № 8, с. 1695
4. Гапонов А. В., Гольденберг А. Л., Григорьев Д. П., Орлова И. М., Панкратова Т. Б., Петелин М. И.— Письма в ЖЭТФ, 1965, 2, № 9, с. 430.
- 5 Ципснюк Ю. М. Пробное тело в открытом резонаторе.— В сб.: Электроника больших мощностей.— М: Наука, 1965, № 4, с. 173.
6. Шестопапов В. П. Дифракционная электроника — Харьков, Высшая школа, 1976. 231 с.
7. Вертий А. А., Петрушин А. А., Шестопапов В. П.— Вестник АН УССР, 1974, № 9, с. 13.
- 8 Вертий А. А., Попенко Н. А., Скрышник Б. К., Шестопапов В. П.— Изв. вузов — Радиофизика, 1975, 18, № 12, с. 1865.
- 9 Бородин А. И., Булгаков Б. М., Матвеева В. А., Родионов А. В., Смородин В. В., Шестопапов В. А.— Электронная техника, Сер. 1 Электроника СВЧ, 1979, вып. 3, с. 13.
10. Коцержинский Б. А., Першин Н. А., Тараненко В. П.— Изв. вузов — Радиоэлектроника, 1981, 24, № 10.
11. Вертий А. А., Иванченко И. В., Шестопапов В. П.— ПТЭ, 1981, № 2, с. 155.

Институт радиофизики и электроники  
АН УССР

Поступила в редакцию  
4 августа 1981 г.

#### EXPERIMENTAL INVESTIGATIONS OF ELECTRODYNAMIC SYSTEM OF A SEMICONDUCTOR CYCLOTRON RESONANCE MASER

*A. A. Vertij, I. V. Ivanchenko, S. V. Koshevaya,  
O. D. Pustyl'nik, V. P. Shestopalov*

Experimental investigations have been carried out of two-mirror quasi-optical resonator — oscillation contour of a semiconductor cyclotron resonance maser at 75.4 GHz. Spectral characteristics of the resonance system is studied at different orientations of the gap with an active semiconductor at a plane mirror relative to the electric vector of the excited field. An open resonator with an astigmatic mirror is suggested and studied. As a result of measurements by the resonance quasi-optical polarimeter it is shown that the natural electromagnetic field of the resonance cell of the generator device is elliptically polarized.