

ХАРАКТЕРИСТИКИ РАСПРОСТРАНЕНИЯ МАГНИТОПЛАЗМЕННЫХ ВОЛН В ПРЯМОУГОЛЬНОМ ВОЛНОВОДЕ С ПОПЕРЕЧНО-НАМАГНИЧЕННЫМ ПОЛУПРОВОДНИКОМ

О. А. Замураев, А. С. Тищенко

Институт радиофизики и электроники им. А. Я. Усикова НАН Украины

12, ул. Ак. Проскуры, Харьков, 61085, Украина

E-mail: legion@ire.kharkov.ua

Экспериментально исследованы характеристики распространения магнитоплазменных волн (МПВ) в волноводе, содержащем поперечно-намагниченный полупроводник. Определены области значений магнитного поля, в которых наблюдается резонансный характер поведения фазовой константы и коэффициента затухания волны. Сравнительный анализ результатов экспериментальных исследований и численных расчетов показал их хорошее совпадение. Ил. 8. Библиогр.: 6 назв.

Ключевые слова: магнитоплазменная волна, полупроводниковая плазма, поверхностные волны, объемные волны, азотная температура.

В настоящее время в связи с освоением миллиметрового и субмиллиметрового диапазонов длин волн возобновился интерес к исследованию магнитоплазменных волн в полупроводниках. Как известно, внешнее постоянное магнитное поле приводит к существенному изменению и обогащению спектра электромагнитных волн в полупроводниках. Условия существования, фазовые и энергетические характеристики распространения магнитоплазменных волн зависят как от значения индукции магнитного поля B , так и от его ориентации относительно границы раздела сред. Эти особенности могут быть использованы при разработке управляющих устройств (аттенуаторы, фазовращатели, циркуляторы и т. д.) миллиметрового и субмиллиметрового диапазонов длин волн. Данной тематике посвящено много работ [1-6]. Однако на вопрос о том, какие типы МПВ могут распространяться в полупроводниковой плазме, и от чего это зависит, до сих пор нет однозначного ответа. Так в работах [1, 2] исследовались характеристики распространения МПВ в поперечно-намагниченной полупроводниковой плазме n -InSb, при этом эффекты, обнаруженные в такой структуре, объясняются наличием поверхностных МПВ. В тоже время авторы работы [3], проводя аналогичные опыты, утверждают, что причиной возникновения этих эффектов являются не поверхностные, а объемные МПВ.

Целью данной работы является разделение типов МПВ и исследование их характеристик распространения в поперечно-намагниченной полупроводниковой плазме.

1. Методика исследований и экспериментальная установка. Для исследований характеристик МПВ использовалась методика, основные положения которой описаны в [4]. По этой методике величины постоянной затухания α и фазовой константы β в исследуемом волно-

водном тракте представляются как результат интерференции двух волн – опорной и прошедшей через участок волновода с поперечно-намагниченной полупроводниковой плазмой.

Схема экспериментальной установки представлена на рис. 1. Ее структура аналогична описанной в работе [4] но в измерительной части этой схемы вместо двойного тройника используется измерительная линия, что позволило существенно повысить точность измерений фазовой константы. Вместе с тем точность измерения постоянной затухания при этом несколько снижается.

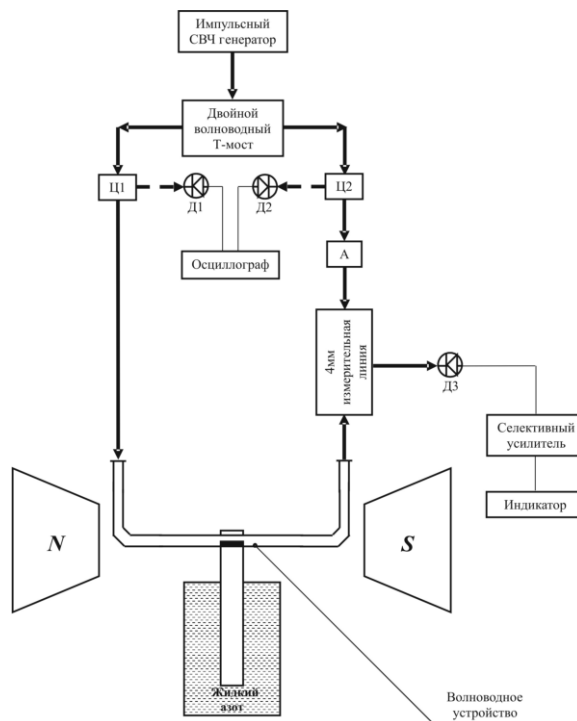


Рис. 1. Схема экспериментальной установки: Ц1-2 – СВЧ циркуляторы; А – аттенуатор; Д1-3 – диоды; N, S – полюса электромагнита

Измерения проводились в следующем порядке. Вначале, когда постоянное внешнее магнитное поле не воздействует на поперечно-намагниченную полупроводниковую плазму, при помощи аттенюатора устанавливается равенство амплитуд опорной (с неизменными параметрами α и β) и прошедшей через волноводное устройство (ВУ) (с параметрами α и β , зависящими от B) волн и фиксируется положение минимумов напряженности электрического поля в измерительной линии. Таким образом, в измерительной линии устанавливается режим стоячих волн. При этом определяется значение α_0 , которое отсчитывается по шкале аттенюатора, и вычисляется

$$\beta_0 = \frac{2\pi}{\lambda_g}, \quad (1)$$

где λ_g – длина волны в волноводе, определяемая по разности между двумя соседними минимумами. После этого к поперечно-намагниченной полупроводниковой плазме прикладывается постоянное внешнее магнитное поле, в результате чего прошедшая волна получает дополнительное амплитудное изменение $\Delta\alpha$ и фазовый сдвиг $\Delta\beta$. Для определения этих параметров, при помощи аттенюатора и смещения зонда измерительной линии снова добиваются установления режима стоячих волн. При этом

$$\Delta\alpha = \alpha - \alpha_0, \quad (2)$$

$$\Delta\beta = \frac{\Delta\varphi}{2\pi L} - \beta_0, \quad (3)$$

$$\Delta\varphi = \frac{2\pi\Delta Z}{\lambda_g} \quad (4)$$

где α – новое значение показаний аттенюатора при котором соблюдается равенство амплитуд обеих волн; ΔZ – смещение минимума в измерительной линии; L – длина полупроводникового образца.

Экспериментальная установка работает следующим образом. Импульсно-модулированные СВЧ колебания от генератора подаются на делитель энергии (двойной волноводный Т-мост), разветвляются на две равные части и проходят по двум трактам: по одному – на вход ВУ, а по другому – на поляризационный аттенюатор, после чего поступают на два конца измерительной линии. Таким образом, в измерительной линии распространяются навстречу одна другой две волны (опорная и прошедшая через ВУ). Чтобы устранить многократные отражения, которые могут обусловить появление фазовой погрешности, в измерительную установку включены развязывающие циркуляторы, которые также можно использовать для измерения характеристик отра-

женных волн. Использование импульсно-модулированного СВЧ сигнала и селективного усилителя настроенного на частоту модулирующего импульса генератора, повышает помехоустойчивость схемы и тем самым снижает погрешность измерений.

ВУ состоит из прямоугольного волновода сечением 5,2x2,6 мм, содержащего поперечно-намагниченную полупроводниковую плазму и медного теплопровода с теплоизоляционным колпаком. Волновод плавно изогнут в E -плоскости с двух сторон для выведения входного и выходного концов из области рабочего зазора электромагнита (показано на рис. 1), что позволяет проводить исследования, как в поперечном, так и в продольном магнитном поле.

Конструкция ВУ схематически представлена на рис. 2. В нем волновод 1 прижимается к теплопроводу 2, имеющему прямоугольный выступ 3 с высотой, равной толщине стенки волновода. Этот выступ входит в окно боковой стенки волновода и к нему приклеивается (припаивается) полупроводниковая пластина 4. Таким образом, создается прямоугольный волноводный канал с закрепленным на боковой стенке полупроводниковым образцом, имеющим непосредственное охлаждение от теплопровода, погружаемого в жидкий азот. Верхняя часть устройства теплоизолируется колпаком 5 из пенопласта, а температура образца измеряется термопарой 6.

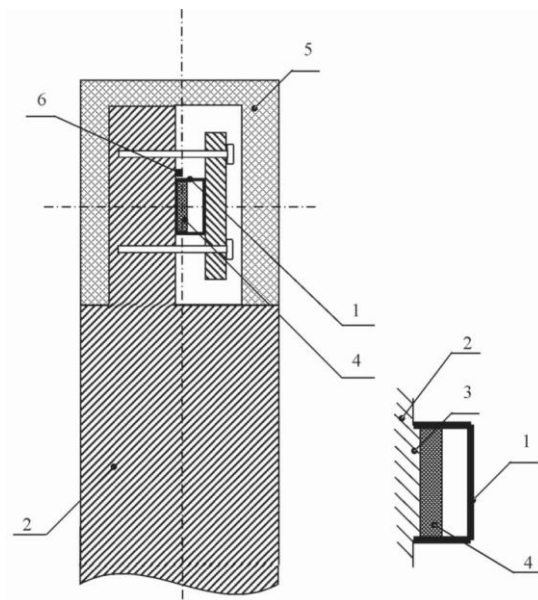


Рис. 2. Схема волноводного устройства

К преимуществам такой конструкции ВУ относятся возможность замены полупроводниковых образцов (например, при исследовании характеристик распространения в зависимости от размеров образцов и их свойств), отсутствие

жидкого азота в области разборного соединения на волноводе, а также возможность проведения исследований при различных температурах.

2. Полученные результаты и их обсуждение. Обработка методики исследований и основные эксперименты были проведены на частоте 70 ГГц во внешнем поперечном магнитном поле, величина индукции которого менялась от 0,05 до 0,95 Т, при температуре 77 К. Полупроводниковые образцы, были выполнены в виде прямоугольных пластин длиной 20 мм, вырезанных из монолитного кристалла *n*-InSb ($n_e = 1,3 \cdot 10^{14} \text{ см}^{-3}$, $\mu_e = 5,3 \cdot 10^5 \text{ см}^2/\text{В с}$) по методике, описанной в работе [1].

Исследование характеристик распространения объемных МПВ. Для исследования характеристик распространения объемных МПВ было создано ВУ, в котором использовался волновод, полностью заполненный полупроводниковой пластиной, как показано на рис. 3.



Рис. 3. Схема расположения полупроводника в волноводе при исследовании объемных МПВ: ■ – полупроводник; ■ – стенки волновода

В такой структуре поверхностные МПВ распространяться не могут [5], так что любые изменения характеристик распространения прошедшей волны обусловлены ее взаимодействием с объемными МПВ. Чтобы полностью исключить возможность возбуждения поверхностных МПВ, между полупроводниковой пластиной и стенками волновода необходимо обеспечить хороший электрический контакт. Для этого образец припаян к стенкам волновода In. Полученные зависимости $\Delta\alpha(B)$ и $\Delta\beta(B)$ для объемных МПВ представлены на рис. 4. Также на рис. 4 пунктирной линией приведены расчетные зависимости $\Delta\alpha(B)$ и $\Delta\beta(B)$, полученные из решений дисперсионного уравнения

$$\frac{k_{yd}}{\varepsilon_d} \text{tg} k_{yd} h \left[k_y \varepsilon_{xx} \text{ctg} k_y (b-h) - i \varepsilon_{xy} k_x \right] + \frac{k_y^2 \varepsilon_{xx} - k_x^2 \varepsilon_{xy}}{\varepsilon_{xx} \varepsilon_y} = 0, \quad (5)$$

где

$$k_y = \sqrt{k_0^2 \varepsilon_y - k_x^2}; \quad k_{yd} = \sqrt{k_0^2 \varepsilon_d - k_x^2}; \quad k_x^2 = \beta^2 + i\alpha^2 \quad (6)$$

$$\varepsilon_y = \varepsilon_{xx} + \frac{\varepsilon_{xy}^2}{\varepsilon_{xx}},$$

$$\varepsilon_{xx} = \varepsilon_p \left[1 + \frac{\omega_p^2}{\omega} \frac{\omega + i\nu}{\omega_c^2 - (\omega + i\nu)^2} \right], \quad (7)$$

$$\varepsilon_{xy} = i \varepsilon_p \frac{\omega_p^2}{\omega} \frac{\omega_c}{\omega_c^2 - (\omega + i\nu)^2},$$

полученных в работе [5] при $h=0$. Здесь ω_p и ω_c – соответственно плазменная и циклотронная частоты электронов в полупроводнике; ε_d – диэлектрическая проницаемость диэлектрика, а ε_p – диэлектрическая проницаемость решетки полупроводника; b – расстояние между широкими стенками волновода; h – толщина диэлектрического слоя, расположенного между полупроводником и верхней стенкой волновода.

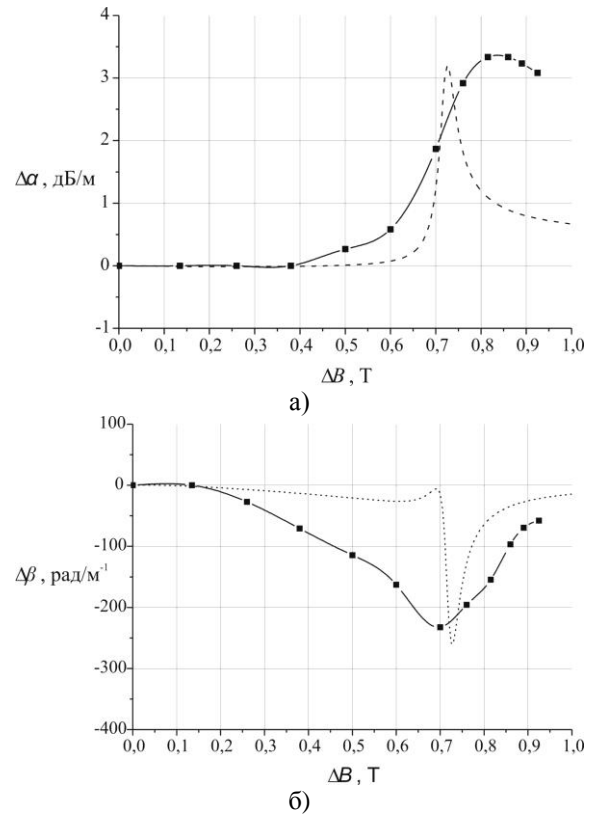


Рис. 4. Зависимость $\Delta\alpha$ и $\Delta\beta$ от величины магнитного поля для объемных МПВ: ◆ – эксперимент; – теория

Для более удобного анализа на этом и последующих графиках теоретические и экспериментальные значения $\Delta\alpha(B)$ и $\Delta\beta(B)$ нормированы таким образом, чтобы они совпадали в точке $B=0$.

Как видно из графика, у кривых, построенных по экспериментальным данным, значение магнитного поля B_r , при котором наблюдается магнитоплазменный резонанс, немного смещено относительно расчетных. Кроме того, они имеют более плавный характер изменения. Такое несоответствие связано с тем, что при решении дисперсионного уравнения в [5] использована двухмерная модель, в которой не учитывается наличие боковых стенок волновода.

Исследование характеристик распространения поверхностных МПВ. Для исследования характеристик распространения поверхностных МПВ, было создано ВУ, в котором использовался волновод, частично заполненный полупроводниковой пластиной, к торцам которой припаивались медные вставки, имеющие для согласования клинообразную форму (рис. 5). В такой структуре объемные МПВ не влияют на характеристики распространения прошедшей волны, так как не выполняются условия для их распространения. Таким образом, любые изменения характеристик распространения прошедшей волны будут обусловлены ее взаимодействием с поверхностными МПВ.

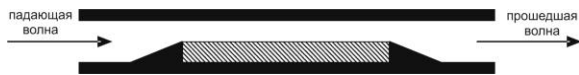


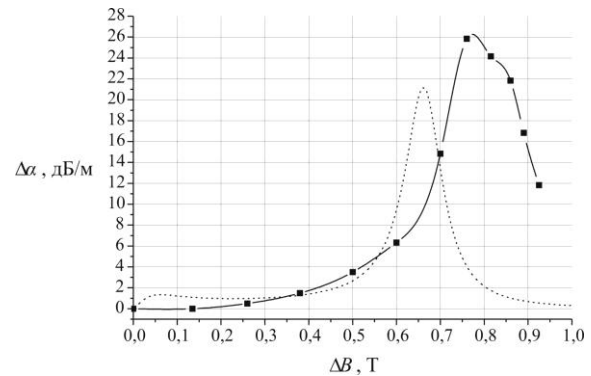
Рис. 5. Схема расположения полупроводника в волноводе при исследовании поверхностных МПВ: ■ – полупроводник; ■ – стенки волновода; ▲ – медные вставки

Полученные зависимости $\Delta\alpha(B)$ и $\Delta\beta(B)$ для поверхностных МПВ представлены на рис. 6. Тут же пунктирной линией приведены расчетные зависимости $\Delta\alpha(B)$ и $\Delta\beta(B)$, полученные из решений системы дисперсионных уравнений [6]

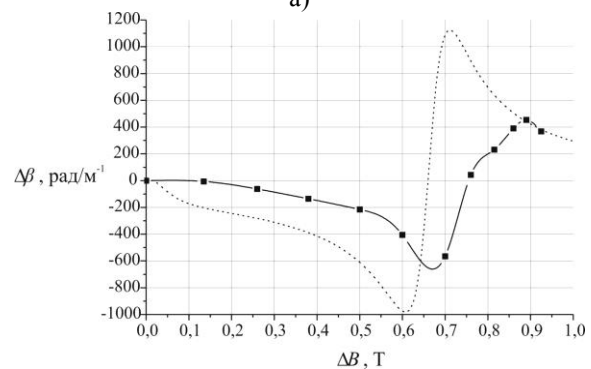
$$\left. \begin{aligned} k_{yd}\varepsilon_v - k_y\varepsilon_d + \varepsilon_d \frac{\varepsilon_{xy}}{\varepsilon_{xx}} k_x &= 0, \\ k_y^2 + k_x^2 &= \varepsilon_v, \\ k_{yd}^2 + k_x^2 &= \varepsilon_d. \end{aligned} \right\} \quad (8)$$

На рис. 6 видно, что кривые, построенные по экспериментальным данным, имеют зависимость, характерную для поверхностных, а не объемных МПВ. Так, на рис. 6, б кривая $\Delta\beta(B)$, построенная по экспериментальным данным, имеет не один (как в случае с объемными МПВ), а два магнитоплазменных резонанса, при этом значение фазовой константы β при B_{r1} меньше,

а при B_{r2} больше β_0 , что характерно только для поверхностных МПВ. Небольшое несоответствие между экспериментальной и расчетной зависимостями можно объяснить неидеальной чистотой поверхности полупроводника, что в свою очередь приводит к появлению локальных неоднородностей, которые могут влиять на поверхностные токи, протекающие в образце [2].



а)



б)

Рис. 6. Зависимость $\Delta\alpha$ и $\Delta\beta$ от величины магнитного поля для поверхностных МПВ: —◆— эксперимент; – теория

Исследование характеристик одновременного распространения объемных и поверхностных МПВ. Приведенные выше результаты описывают случаи, когда основной вклад в изменения характеристик распространения волны был обусловлен влиянием только объемных, или только поверхностных МПВ. Но при определенных условиях в волноводе с поперечно-намагниченной полупроводниковой плазмой можно получить одновременное распространение и взаимодействие с прошедшей волной объемных и поверхностных МПВ. Для практического решения такой задачи было создано ВУ, в котором использовался волновод, частично заполненный полупроводниковой пластиной с открытыми торцами (рис. 7). Таким образом, между верхней металлической стенкой волновода и поверхностью полупроводниковой пластины образуется диэлектрический слой толщиной h (в приведенных экспериментах – воздушный зазор).

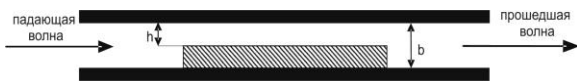


Рис. 7. Схема волновода, частично заполненного полупроводником: ■ – полупроводник; ■ – стенки волновода

Такая модель была теоретически рассмотрена в работе [5]. Из этого рассмотрения следует, что в такой структуре могут одновременно существовать и взаимодействовать с прошедшей волной как объемные, так и поверхностные МПВ. Характер влияния объемных и поверхностных МПВ на характеристики распространения прошедшей волны зависит от соотношения $(b-h)$ [5].

На рис. 8 представлены зависимости $\Delta\alpha(B)$ и $\Delta\beta(B)$ МПВ для частично заполненного поперечно-намагниченной полупроводниковой плазмой волновода.

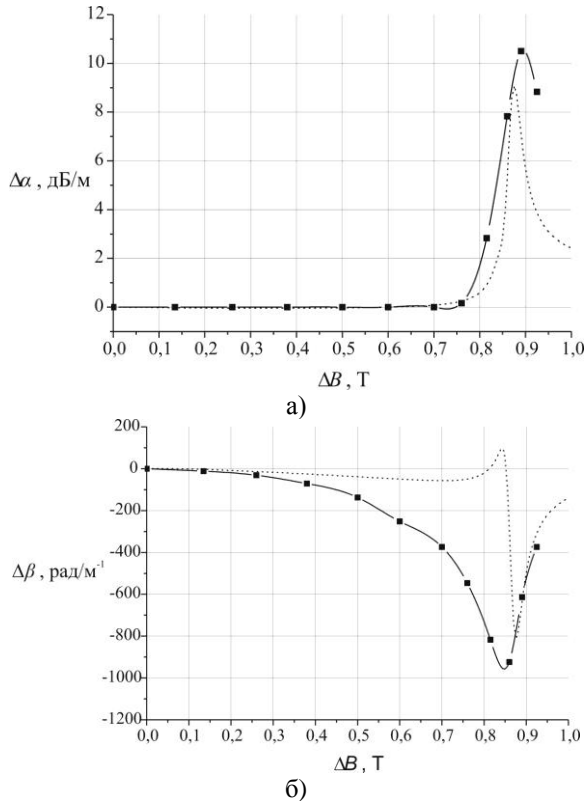


Рис. 8. Зависимость $\Delta\alpha$ и $\Delta\beta$ от величины магнитного поля в частично заполненном полупроводником волноводе ($b = 1,6$ мм, $h = 1,0$ мм): ◆ – эксперимент; – теория

Также на рис. 8 пунктирной линией приведены расчетные зависимости $\Delta\alpha(B)$ и $\Delta\beta(B)$, полученные из решения дисперсионного уравнения (5). Соотношение $(b-h)$ в эксперименте выбрано таким, что поверхностные и объ-

емные МПВ в равной степени оказывают влияние на характеристики распространения прошедшей волны. Экспериментально полученная зависимость $\beta(B)$ на рис. 8, б имеет один магнитоплазменный резонанс, при котором значение фазовой константы β меньше β_0 , что указывает на влияние объемных МПВ на прошедшую волну. В то же время эта кривая имеет более резко выраженный резонансный характер. Кроме того, амплитудное значение β в точке B_r по величине почти в четыре раза больше, чем для случая с объемными МПВ. Эти результаты можно объяснить влиянием поверхностных МПВ на характеристики распространения прошедшей волны.

Выводы. В результате проведенных исследований показано, что в волноводе, содержащем поперечно-намагниченную полупроводниковую плазму, в зависимости от конфигурации и способа возбуждения полупроводниковой плазмы, могут распространяться объемные и поверхностные МПВ как в отдельности, так и одновременно. Предложена новая модель для исследования характеристик поверхностных МПВ. Экспериментально подтверждено, что в частично заполненном поперечно-намагниченной полупроводниковой плазмой прямоугольном волноводе возбуждаются и распространяются одновременно объемные и поверхностные МПВ. При этом в проведенных экспериментах с полупроводником InSb получено значительное уменьшение фазовой скорости волны до 0,4 с, а изменение фазы сигнала достигает величины 80° .

Результаты работы представляют практическую ценность, в частности, они могут быть использованы при создании управляющих устройств в миллиметровом диапазоне длин волн.

1. *Obunai T., Sekiguchi T.* Observation of a slow-surface wave in millimeter wave solid-state plasma waveguide // Japanese journal of applied physics. - 1974. - **13**, №1. - P.93-108.
2. *Toda M.* Propagation in a solid state plasma waveguide in a transverse magnetic field // Journal of the physical society of Japan. - 1964. - **19**, №7. - P.1126-1130.
3. *Лауринавичус А., Малакаускас П.* Распространение магнитоплазменных волн в объеме и у поверхности полупроводника под углом к внешнему магнитному полю // Физика и техника полупроводников. - 1984. - **18**, вып. 1. - С.79-82.
4. *Альшиулер Ю. Г., Кац Л. И., Ревзин Р. М.* Экспериментальное исследование распространения электромагнитных волн миллиметрового диапазона в волноводе, заполненном n-InSb в магнитном поле // Изв. Вузов. – Радиоэлектроника. - 1972. - **15**, вып. 8. - С.938-944.
5. *Захаров В. А.* О медленных волнах плоскопараллельного волновода, заполненного двухслойной структурой диэлектрик – поперечно намагниченная полупроводниковая плазма // Радиотехника и электрон. - 1981. - **26**, вып. 4. - С.673-682.
6. *Давыдов А. Б., Захаров В. А.* К вопросу о распространении магнитоплазменных поверхностных волн в полупроводниках // Физика твердого тела. - 1975. - **17**, вып. 1. - С.201-207.

CHARACTERISTICS OF DISTRIBUTION
MAGNETOPLASMA OF WAVES IN RECTAN-
GULAR WAVEGUIDE WITH CROSS-SECTION
MAGNETIZED SEMICONDUCTOR

O. A. Zamuraev, A. S. Tishenko

Characteristics of distribution magnetoplasma waves (MPW) in a waveguide containing cross-section magnetized semiconductor are experimentally investigated. Areas of values of a magnetic field in which resonant character of behaviors of a phase constant and factor of attenuation of a wave is observed are determined. The comparative analysis of results of experimental researches and numerical calculations has shown their good coincidence.

Key words: magnetoplasma wave, semi-conductor plasma, superficial waves, volumetric waves, nitric temperature.

ХАРАКТЕРИСТИКИ ПОШИРЕННЯ МАГНІТО-
ПЛАЗМОВИХ ХВИЛЬ У ПРЯМОКУТНОМУ
ХВИЛЕВОДІ З ПОПЕРЕЧНО-НАМАГНІЧЕНИМ
НАПІВПРОВІДНИКОМ

О. О. Замураєв, А. С. Тищенко

Експериментально досліджено характеристики поширення магнітоплазмових хвиль (МПХ) у хвилеводі, що містить поперечно-намагнічений напівпровідник. Визначено області значень магнітного поля, у яких спостерігається резонансний характер поведінки фазової константи й коефіцієнта загасання хвилі. Порівняльний аналіз результатів експериментальних досліджень і чисельних розрахунків показав їхній гарний збіг.

Ключові слова: магнітоплазмова хвиля, напівпровідникова плазма, поверхневі хвилі, об'ємні хвилі, азотна температура.

Рукопись поступила 2 августа 2007 г.