

- [1] *Островский Ю. И., Бутусов М. М., Островская Г. В.* Голографическая интерферометрия. М.: Наука, 1977. 336 с.
- [2] *Дрейден Г. В., Зайдель А. Н., Островская Г. В.* и др. // Физика плазмы. 1975. Т. 1. С. 462—482.
- [3] *Ривлин Л. А., Семенов А. Т., Якубович С. Д.* Динамика и спектры излучения полупроводниковых лазеров. М.: Радио и связь, 1983. 208 с.
- [4] *Малахова В. И., Ривлин Л. А., Тамбиев Ю. А., Якубович С. Д.* // Квантовая электрон. 1980. Т. 7. № 6. С. 1252—1256.
- [5] *Мирзабеков А. М., Митрофанов Н. К., Островский Ю. И., Шедова Е. Н.* // ЖТФ. 1981. Т. 51. Вып. 10. С. 2038—2042.
- [6] *Королев А. Е., Назаров В. Н., Стаселько Д. И.* и др. // Опт. и спектр. 1986. Т. 61. Вып. 5. С. 919—921.
- [7] *Bernabei E., Alvarez J. M.* // Phys. Rev. A. 1980. Vol. 22. N 6. P. 2690—2695.
- [8] *Happer W.* // Rev. of Modern Phys. 1972. Vol. 44. N 1. P. 169.
- [9] *Beverini N., Minguzzi P., Strumia F.* // Phys. Rev. A. 1971. Vol. 4. N 2. P. 550—555.
- [10] *Королев А. Е., Стаселько Д. И.* // ЖТФ. 1984. Т. 54. Вып. 2. С. 314—322.
- [11] *Жмудь А., Дуб А., Матыко Ю., Морозова Г.* // Радио. 1986. № 10, 11.

Поступило в Редакцию
11 июля 1988 г.

ВОЗБУЖДЕНИЕ МЕДЛЕННЫХ ЦИКЛОТРОННЫХ ВОЛН В ЭЛЕКТРОННОМ ПУЧКЕ С ПОМОЩЬЮ РЕЗОНАТОРА *H*-ТИПА

*В. Г. Гапанович, Б. И. Иванов, М. И. Капчинский, Р. А. Мещеров,
П. В. Мирунов, В. С. Рыбалко, А. А. Савенко, В. Д. Сажин, Л. А. Юдин*

Возбуждение медленной циклотронной волны (МЦВ) в сильноточном электронном пучке является важным этапом в разработке метода коллективного ускорения ионов, основанного на предложении М. Слоана и В. Драммонда [1]. Первое сообщение об экспериментальных исследованиях по возбуждению азимутально-симметричной МЦВ в пучках малой мощности появилось в [2]. Волны большой амплитуды (~10 МВ/м), но весьма малой длительности (~60 нс) были получены в Остине (США) [3]. В этих экспериментах возбуждение МЦВ происходило при взаимодействии пучка с отрезком спирального волновода и использовании внешнего генератора СВЧ мощности.

Между тем циклотронные волны пучка неоднократно использовались для генерации СВЧ излучения в приборах типа мазера на циклотронном резонансе (см., например, [4]), основанных на взаимодействии пучка с резонаторными структурами, возбуждаемыми на колебаниях *H*-типа. Как известно, условие циклотронного резонанса

$$\omega - k_z u = n\Omega,$$

где ω — частота резонатора; $\Omega = eB_0/\gamma mc$ — циклотронная частота; e , m — заряд и масса покоя электронов; c — скорость света; B_0 — продольное магнитное поле; γ — релятивистский фактор; k_z — продольное волновое число; u — скорость пучка, которая в таких приборах сводится к $\omega \approx n\Omega$, так что взаимодействие пучка происходит с однородными модами резонатора ($k_z = 0$).

Для возбуждения МЦВ ($\omega \ll k_z u$) условие резонанса $k_z u \approx \Omega$, наоборот, требует работы на модах с сильной пространственной вариацией. Заметим также, что для целей СВЧ генерации необходимы резонаторы с низкой радиационной добротностью, что определяет выбор открытых резонаторов. Для возбуждения МЦВ разумнее использовать закрытые высокодобротные резонаторы, что позволяет снизить стартовый ток.

В работе приводятся результаты эксперимента по возбуждению МЦВ микросекундной длительности при взаимодействии сильноточного электронного пучка с пассивным закрытым резонатором *H*-типа, периодически нагруженным трубками дрейфа.

Эксперименты проводились на сильноточном электронном ускорителе микросекундного диапазона, предназначенного для исследования коллективных методов ускорения ионов [5].

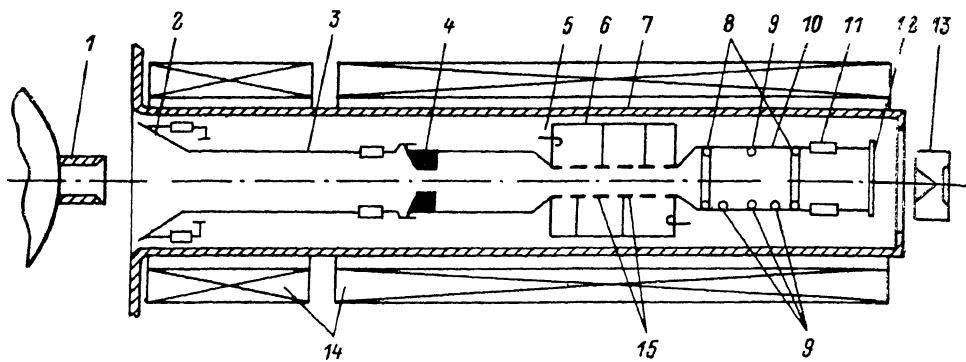


Рис. 1. Схема экспериментальной установки.

1 — катод, 2 — анод, 3 — лайнер, 4 — диафрагма, 5 — петля связи, 6 — резонатор, 7 — вакуумная камера, 8 — индукционные датчики, 9 — магнитные зонды, 10 — секция диагностики, 11 — шунт обратного тока, 12 — коллектор, 13 — камера-обскура, 14 — секционированный соленоид, 15 — трубки дрейфа.

Характерные параметры пучка следующие: энергия 150—500 кэВ, ток 0.5—1.5 кА, длительность импульса 4—12 нс.

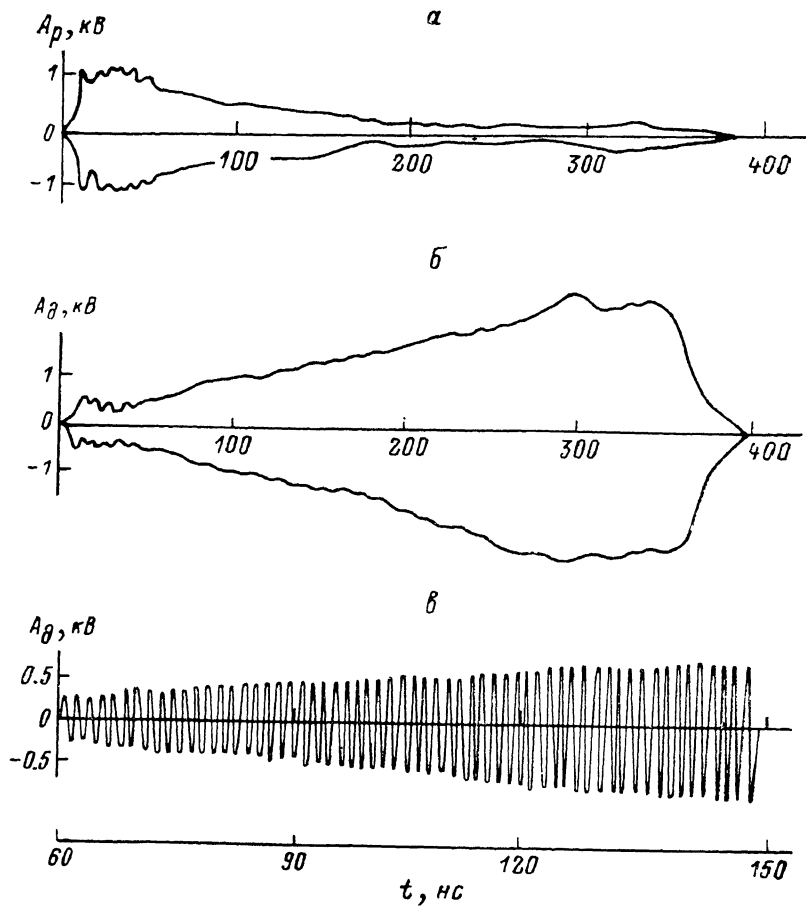


Рис. 2. Осциллограммы с петли связи H -резонатора (а) и индукционного датчика (б, в) в поле 1.0 Тл.

На рис. 1 приводится схема эксперимента. Грубчатый электронный пучок формируется во взрывоэмиссионном диоде с магнитной изоляцией, распространяется внутри лайнера,

затем проходит диафрагму, резонатор и секцию диагностики МЦВ. Расстояние от катода до коллектора 2 м, апертура трубок дрейфа резонатора 40 мм, радиус пучка 5—17 мм, внешнее магнитное поле 0.3—1.5 Тл, давление остаточного газа $3 \cdot 10^{-5}$ Тор. Прохождение пучка вдоль канала транспортировки и качество юстировки контролировались шунтами обратного тока и камерой-обскурой.

Резонатор представляет собой медный цилиндр с внутренним диаметром 14 см и длиной 33 см, внутри которого на штангах установлено 15 одинаковых трубок дрейфа. Трубки длиной 1 см закреплены на противоположно расположенных образующих цилиндра. На концах резонатора имеются петли связи, которые используются при проведении холодных измерений и регистрации возбуждаемых пучком колебаний. Измерены спектр собственных частот резонатора в диапазоне 200—1250 МГц и соответствующие им распределения полей низших типов колебаний. Возбуждение резонатора пучком и генерация МЦВ происходили на частоте 670 МГц, которой соответствует азимутально-симметричное в присоединенной области колебание с четырьмя вариациями поля по длине всего резонатора. Добротность ненагруженного резонатора на этой частоте 3000, шунтовое сопротивление 18 МОм/м.

Основной целью экспериментов являлись возбуждение и регистрация азимутально-симметричных волн в электронном потоке, а также измерение длины волны с целью определения ее фазовой скорости. Для этого в секции диагностики, расположенной за резонатором, были установлены однорезонаторные магнитные зонды-петли площадью 0.8 см². Зонды были ориентированы на составляющую магнитного поля B_z высокочастотных колебаний и располагались на различном удалении от резонатора по ходу распространения пучка. Кроме того, в начале и конце секции диагностики были установлены два индукционных датчика нулевой моды в виде петель, охватывающих весь пучок.

Характерные сигналы с петли связи в резонаторе и индукционного датчика, охватывающего пучок, представлены на рис. 2. Генерация циклотронной волны начинается на фронте импульса тока, через 50—100 нс от начала и длится 0.4—1.0 мкс. Сигнал с камеры-обскуры показывает возрастание поперечных размеров пучка. Мощность активных потерь в стенках резонатора достигает 0.5 МВт. Напряженность электрического поля между трубками дрейфа при этом составляет величину 100—300 кВ/см. Срыв колебаний в резонаторе обусловлен пробоями зазоров между трубками дрейфа.

Специфика взаимодействия пучка с резонатором в данном эксперименте заключается в следующем. Во-первых, в силу низкой частоты возбуждаемой моды $\omega \ll \Omega$ в полосу резонанса попадают как попутная пучку $\omega = k_z^{(+)}u - \Omega$, так и встречная волны $\omega = \Omega - k_z^{(-)u}$ (в высокооборотном резонаторе эти резонансы не перекрываются). Первая из них возбуждает резонатор, а вторая демпфирует его колебания. Таким образом, результат — генерация или затухание — зависит от того, какая из этих волн ближе к точному резонансу. Во-вторых, картина возбуждения наблюдается на фронте пучка, когда энергия электронов, а тем самым и циклотронная частота Ω зависят от времени. В силу этого генерация и затухание сменяют друг друга. Поэтому здесь нельзя воспользоваться результатами существующей теории возбуждения колебаний резонатора пучком, основанной на предположении постоянства параметров пучка (см., например, [8]). Наши оценки показывают, что уровень возбуждения определяется не добротностью резонатора и не нелинейными волновыми свойствами пучка, а именно быстротой изменения его параметров и возникающей при этом конкуренцией процессов увеличения и спада амплитуды колебаний.

Длина циклотронной волны в пучке измерялась с помощью двух магнитных зондов, разделенных базой 12 см и включенных по схеме интерферометра. Измеряемый суммарный сигнал с этих зондов имел четко выраженные максимумы, соответствующие целому числу длин волн, укладываемому на данной базе. Это позволило определить длину пучковой

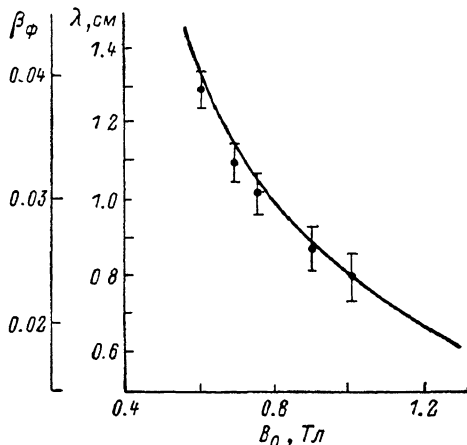


Рис. 3. Зависимость фазовой скорости β_ϕ и длины волны МЦВ от величины магнитного поля B_0 .

Сплошная кривая — расчет.

волны, а тем самым и ее относительную фазовую скорость β_ϕ и сравнить ее с расчетной величиной для циклотронной волны

$$\beta_\phi = \frac{\omega\beta}{\Omega} = \frac{m\omega}{eB_0} \beta\gamma,$$

где $\beta = u/c$ — относительная скорость электронов. Результаты измерений и расчета приведены на рис. 3.

Измерение амплитуды продольной составляющей магнитного поля МЦВ, выполненное по результатам показаний одного из магнитных зондов, дает величину ~ 17 Гс (соответствует ~ 0.5 МВ/м) при расположении зонда в 3.5 см от оси камеры. При приближении зонда к пучку наведенный сигнал увеличивается; экстраполяция показаний зонда на внешнюю границу пучка приводит к значению амплитуды компоненты B_z , соответствующему 6—10 МВ/м. Заметим, что линейная теория МЦВ в электронном пучке [7] дает для связи амплитуд компонент E_z и B_z соотношение $B_z = \beta E_z$.

Основной вывод работы заключается в том, что в стомегаваттном электронном пучке без использования внешнего генератора возбуждена азимутально-симметричная медленная циклотронная волна микросекундной длительности.

Список литературы

- [1] Sloan M. L., Drummond W. E. // Phys. Rev. Lett. 1973. Vol. 31. N 20. P. 1234—1237.
- [2] Иванов Б. И., Горожанин Д. В., Мирошниченко В. А. // Письма в ЖТФ. 1979. Т. 5. Вып. 18. С. 1112—1116.
- [3] Cornet E., Davis H. A., Starke T. P. et al. // Phys. Fluids. 1981. Vol. 24. N 11. P. 2039—2048.
- [4] Гиротрон. Сб. статей. Горький, 1981. 254 с.
- [5] Казанский Л. Н., Краснопольский В. А., Крылов С. Ю. и др. // Функциональные узлы и системы ускорителей заряженных частиц. М., 1984. С. 3—9.
- [6] Гинзбург Н. С. // Изв. вузов. Радиофизика. 1979. Т. 22. № 4. С. 470—479.
- [7] Капчинский М. И., Юдин Л. А. // Изв. вузов. Радиофизика. 1981. Т. 24. № 2. С. 151—160.

Поступило в Редакцию
12 июля 1988 г.

В окончательной редакции
22 мая 1989 г.

ГИСТЕРЕЗИСНЫЕ ЯВЛЕНИЯ В СТРУКТУРАХ МЕТАЛЛ—СЕГНЕТОЭЛЕКТРИК—ПОЛУПРОВОДНИК НА ОСНОВЕ ТОНКИХ ПЛЕНОК $\text{Sn}_2\text{P}_2\text{S}_8$

Д. Н. Санджиев, Н. А. Косоногов, Э. А. Савченко,
Е. Д. Розач, Н. П. Проценко

Ранее нами сообщалось об исследовании гистерезисных эффектов в структурах металл—сегнетоэлектрик—полупроводник (МСЭП) на основе тонких пленок тиофосфата олова $\text{Sn}_2\text{P}_2\text{S}_8$, нанесенных на подложки из монокристаллического кремния р-типа удельного сопротивления 10 Ом·см [1].

Эффект поля тесно связан с положением уровня Ферми в полупроводнике, который в свою очередь определяется степенью легирования или же удельным сопротивлением полупроводника. В данной работе методами вольт-фарадных (ВФХ) и вольт-сименсных характеристик (ВСХ) исследованы аналогичные структуры с удельным сопротивлением подложки 70 Ом·см.

Тонкие пленки $\text{Sn}_2\text{P}_2\text{S}_8$ наносились на монокристаллические кремниевые подложки с ориентацией (111) методом вакуумного термического испарения в квазизамкнутом объеме (метод «горячей стенки») [2]. На свободные поверхности пленки и подложки были напылены алюминиевые электроды. Круглые электроды на поверхности пленки имели площадь 2.5—