

и пространственные характеристики излучения при воспроизводимости 90–95%. Это обусловлено тем обстоятельством, что на ранних стадиях развития генерации при сравнительно низком уровне мощности излучения ($\sim 10^4$ Вт/см²) в резонаторе происходит „включение“ ВРМБ-зеркала. При этом в момент „переключения“ добротности резонаторов расходимость излучения еще близка к дифракционной. Начиная с этого момента отраженная от ВРМБ-зеркала обращенная волна создает преимущественные условия для формирования излучения с улучшенной диаграммой направленности. Вследствие того, что процесс восстановления волнового фронта обращенной компоненты излучения происходит на каждом проходе излучения по резонатору, в процессе развития генерации компенсируются статические неоднородности, возникающие внутри резонатора из-за несовершенства оптических элементов, и динамические возмущения, обусловленные тепловыми или механическими нагрузками. Последнее обстоятельство способствует более полному и эффективному съему энергии с активного элемента и, как результат, формированию мощного наносекундного излучения с предельно узкой диаграммой направленности.

Л и т е р а т у р а

- [1] Белостоцкий Б.Р., Любавский Ю.В., Орчинников В.М. Основы лазерной техники. М.: Сов. радио, 1972. 407 с.
- [2] Зельдович Б.Я., Пилипецкий Н.Ф., Шкунов В.В. – УФН, 1982, т. 138, в. 5, с. 249–288.

Институт электроники
АН БССР, Минск

Поступило в Редакцию
28 февраля 1988 г.

Письма в ЖТФ, том 14, вып. 13

12 июля 1988 г.

ОПТИМИЗАЦИЯ ЭЛЕКТРОДНОЙ СТРУКТУРЫ ИНТЕГРАЛЬНО-ОПТИЧЕСКИХ МОДУЛЯТОРОВ БЕГУЩЕЙ ВОЛНЫ

Е.М. Золотов, В.М. Пелехатый,
Р.Ф. Тавлыкаев

В работе [1] был предложен метод расширения частотной полосы интегрально-оптических модуляторов бегущей волны, обеспечивающий равномерную частотную характеристику без ограничения на снижение удельной мощности $\frac{P}{\Delta f}$. Метод основывался на нахождении оптимальной зависимости перекрытия оптического и электрического по-

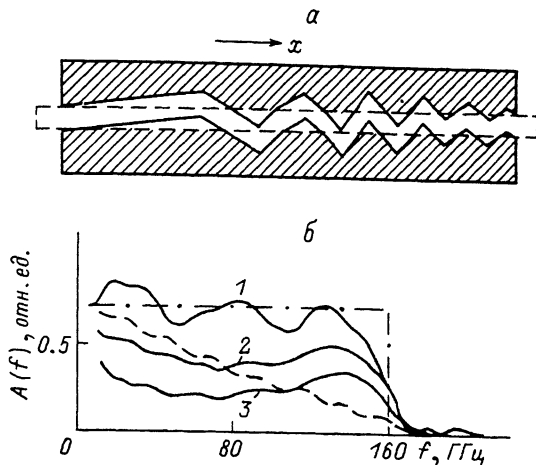


Рис. 1. Эскиз „треугольной“ электродной структуры (а) и частотная зависимость электрооптического набега фазы (б) для широкополосного модулятора. Кривая 1 – без учета потерь (штрихпунктиром обозначена АЧХ для бесконечнодлинных электродов плавной формы); кривые 2, 3 – распространение волн справа налево для $\gamma' = 1$; $2 \text{ дБ} \cdot \text{см}^{-1} \text{ ГГц}^{-1/2}$ соответственно; пунктирная кривая – распространение слева направо для $\gamma = 1 \text{ дБ} \cdot \text{см}^{-1} \cdot \text{ГГц}^{-1/2}$. Длина электродов 10 мм.

лей модулятора. Задавая для модулятора необходимый вид амплитудно-частотной и фазово-частотной характеристик (АЧХ и ФЧХ), путем обратного Фурье-преобразования (ФП) определяется соответствующая функция пространственного перекрытия оптического и электрического полей. Настоящая статья посвящена развитию указанного метода с целью оптимизации параметров интегрально-оптических модуляторов бегущей волны, разработке структуры электродов (как для широкополосного, так и полосового режима работы), а также учету влияния реальных потерь на характеристики модулятора.

Рассматриваемая схема модулятора предполагает одномодовый каналный волновод на Z -срезе ниобата лития. Электроды в виде планарной полосковой линии с постоянным зазором расположены на поверхности кристалла. Положение волновода относительно межэлектродного зазора (характеризуемое расстоянием A между их центрами) меняется в направлении распространения света, что приводит к соответствующей зависимости от координаты x (вдоль волновода) интеграла перекрытия оптического и электрического полей $G(x) = G(A(x))$. В работе [1] был определен вид функции пространственного перекрытия (ФПП) $F(x) = \frac{G(x)}{G_0}$ ($G_0 = \max |G(x)|$), при реализации которой модулятор будет иметь

равномерную АЧХ в заданном частотном диапазоне СВЧ-сигнала $0 \leq f \leq f_B$. Используя ФПП, можно определить соответствующую ей геометрию электродов, а именно зависимость $\Delta = \Delta(x)$. Для этого необходимо рассчитать (для конкретных значений волноводных параметров [2] и ширины зазора g) зависимость $G = G(\Delta)$ [3] и обратную ей функцию $\Delta = \Delta(G)$. Геометрию электродов можно затем вычислить (по известной ФПП), как сложную функцию от x :

$$\Delta(x) = \Delta(G(x)) = \Delta(G_0 F(x)). \quad (1)$$

Численные расчеты зависимости $G(\Delta)$ показали, что ее вид определяется в основном отношением ширины волновода W и зазора g . При условии $\frac{W}{g} \approx 1$, которое, как правило, выполняется в интегрально-оптических модуляторах [4], в первом приближении она имеет вид $G(\Delta) \sim \Delta$. Отсюда следует, что функция $\Delta(x)$, описывающая форму края электродов, подобна $F(x)$. Поскольку такую плавную форму края достаточно сложно реализовать, мы рассмотрели более простые топологии, в частности, структуру электродов, описываемую кусочно-линейной функцией, аппроксимирующей зависимость (1). В качестве критерия аппроксимации использовалась величина вносимой неравномерности АЧХ. Последнюю рассчитывали как амплитуду ФП от ФПП, соответствующей данной структуре электродов [1]. В результате проведенной нами оптимизации параметров кусочно-линейной структуры (по числу изломов и их положению) было установлено, что широкополосная АЧХ может быть обеспечена структурой электродов „треугольной“ геометрии (рис. 1,а). Последняя описывается функцией $\Delta_{\text{ш}}(x)$, точки изломов которой совпадают с экстремумами и нулями найденной в [1] $F(x)$, а значения $\Delta_{\text{ш}}(x)$ в этих точках вычисляются, используя (1). В этом случае неравномерность АЧХ будет менее 1.3 дБ (рис. 1,б).

С целью исследования влияния СВЧ-потерь на характеристики модулятора с „треугольной“ геометрией электродов были выполнены расчеты АЧХ для реальных (1–2 дБ/см·ГГц^{1/2}) значений коэффициентов затухания γ СВЧ-волны. Результаты представлены на рис. 1,б. Видно, что для случая распространения СВЧ-волны и света в направлении высокочастотной части электродов (в направлении оси x на рис. 1,а) АЧХ имеет сильную неравномерность (~ 15 дБ) со спадом на высоких частотах. При распространении волн в противоположном направлении частотная полоса и равномерность АЧХ сохраняются.

Предложенный в [1] метод был применен для расчета структуры электродов, которая обеспечивает модулятору АЧХ полосового типа. Задавая равномерную АЧХ для полосового режима ($A(f) = \text{const}$ при $f_1 \leq f \leq f_2$ и $A(f) = 0$ вне этого частотного диапазона), полагая при этом квадратичный вид ФЧХ [1], путем обратного ФП можно получить соответствующую ей ФПП в виде:

$$F\left(\frac{x}{l}\right) = \frac{1}{\sqrt{2}} \left\{ [C(z_2) - C(z_1)] \cos\left(\frac{\pi}{2} z_2^2\right) + [S(z_2) - S(z_1)] \sin\left(\frac{\pi}{2} z_2^2\right) \right\}, \quad (2)$$

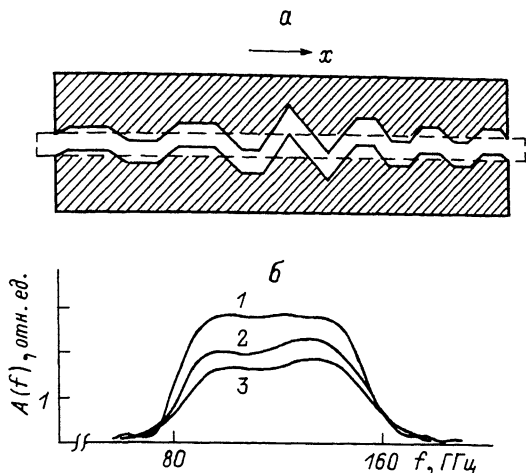


Рис. 2. Эскиз «трапецидальной» электродной структуры (а) и АЧХ (б) для полосового модулятора ($B = 4$, $L = 0.57$ мм, $\alpha = 0.5$). Кривая 1 – без учета потерь; кривые 2, 3 – распространение волн справа налево для $\gamma = 1$, 2 дБ $\text{см}^{-1} \cdot \text{ГГц}^{-1/2}$ соответственно. Длина электродов 9 мм.

где C , S – интегралы Френеля [5], L – масштабная длина,

$$z_1 = \frac{x}{LB} - \frac{B(1-\alpha)}{2}, \quad z_2 = \frac{x}{LB} + \frac{B(1-\alpha)}{2}, \quad \alpha = \frac{f_1}{f_2}, \quad B - \text{параметр,}$$

характеризующий величину квадратичности ФЧХ. Уровень АЧХ, соответствующей ФПП вида (2), возрастает пропорционально B и не зависит от частот f_1 и f_2 , которые определяются параметрами L и α . Следовательно, реализация ФПП в виде зависимости (2) при соответствующих параметрах B , L и α позволит обеспечить модуляцию света с заданной эффективностью при сохранении требуемого частотного диапазона. Выполненные нами расчеты показали, что $F(x)$ вида (2) может аппроксимироваться ФПП, получаемой с помощью электродов «трапецидальной» геометрии (рис. 2,а); неравномерность АЧХ при этом будет ~ 0.5 дБ. Учет потерь в электродах изменяет расчетную АЧХ, что продемонстрировано на рис. 2,б.

Таким образом, в работе выполнен расчет электродных структур интегрально-оптических модуляторов бегущей волны для широкополосного и полосового режима работы, проведена оптимизация их параметров и исследовано влияние потерь для СВЧ-волны на АЧХ устройства.

Л и т е р а т у р а

- [1] Золотов Е.М., Пелехатый В.М., Тавлыкаев Р.Ф. – Письма в ЖТФ, 1987, т. 13, № 20, с. 1217–1221.

- [2] Бурицкий К.С., Золотов Е.М., Прохоров А.М., Черных В.А. - Квантовая электроника, 1981, т. 8, № 4, с. 805-811.
- [3] Marcuse D. - IEEE J. of Quant. El., 1982, v. QE-18, N 3, p. 393-398.
- [4] Alferness R.C. - IEEE Trans. Microwave Theory and Technology, 1982, v. MTT-30, N 8, p. 1121-1137.
- [5] Анго А. Математика для электро- и радиоинженеров, М.: Наука, 1967. 780 с.

Институт общей физики
АН СССР, Москва

Поступило в Редакцию
17 марта 1988 г.

Письма в ЖТФ, том 14, вып. 13

12 июля 1988 г.

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ОПРЕДЕЛЕНИЕ
ДИСПЕРСИОННЫХ ХАРАКТЕРИСТИК
ЭЛЕКТРОННОГО ОБЛАКА
В НЕОДНОРОДНЫХ СКРЕЩЕННЫХ ПОЛЯХ

С.А. Левчук, Г.Г. Соминский,
С.В. Воскресенский

Электронный пространственный заряд высокой плотности, удерживаемый в скрещенных электрическом и магнитном полях, является своеобразной активной средой широкого класса устройств сильноточной электроники. Коллективные колебания объемного заряда определяют, как правило, основные их характеристики. В реализуемых на практике системах удерживающие заряд поля существенно неоднородны. Поэтому колебания носят трехмерный характер [1, 2]. К тому же они чувствительны к малым возмущениям и нестационарны [3]. Все это делает трудноразрешимой задачу экспериментального определения дисперсионных характеристик такой сложной колебательной системы, поскольку требует использования слабовозмущающих методов исследования, обладающих одновременно высокими показателями пространственного и временного разрешения.

В настоящей работе показана возможность использования для получения такой информации разработанной недавно новой методики [4]. Были измерены дисперсионные характеристики электронного облака в типичной системе со скрещенными полями - мощном импульсном усилителе-амплитроне десятисантиметрового диапазона длин волн с размерами пространства взаимодействия: диаметр катода 18 мм, диаметр анода 28 мм, длина анода 35 мм.

Определение характеристик колебаний проводилось на основе рассмотрения ВЧ модуляции потоков электронов, попадающих через три малые (диаметром 0.5 мм) отверстия внутрь вторично-эмиссионного