

УДК 621.373

А. И. БОРОДКИН, канд. физ.-мат. наук, *Б. М. БУЛГАКОВ*, канд. физ.-мат. наук, *Ю. Г. КОЧУРОВСКИЙ*, *В. Н. ПОДШИВАЛОВ*, канд. техн. наук, *А. В. РОДИОНОВ* канд. техн. наук, *В. В. СМОРОДИН*, канд. физ.-мат. наук,
Ю. Д. ЧИСТЮХИН

ГЕНЕРАТОР ГАННА С РАСПРЕДЕЛЕННЫМ ВЗАИМОДЕЙСТВИЕМ

Генераторы Ганна и лавинно-пролетный полупроводниковый диод (ЛПД) представляют собой наиболее распространенные полупроводниковые источники колебаний СВЧ. В определенной мере эти приборы служат полупроводниковыми аналогами клистрона. Общим для них является сосредоточенный характер взаимодействия носителей заряда с СВЧ-полем резонатора, что существенно ограничивает объем пространства взаимодействия и генерируемую мощность.

Представляется интересным создание полупроводниковых аналогов электровакуумных СВЧ-приборов с распределенным взаимодействием. Для реализации такого взаимодействия необходимо замедлить электромагнитную волну в полупроводнике в 10^3 раз по сравнению со скоростью света, так как в твердотельной плазме из-за рассеяния носителей заряда фононами их скорость не превышает $(2-3) \cdot 10^7$ см/с. Однако в однородной твердотельной плазме волны, обладающие столь малыми фазовыми скоростями, неизвестны. Основным параметром, ограничивающим возможности понижения скорости плазменных и магнитоплазменных волн, является высокая частота соударений электронов [1]. Поэтому следует использовать внешние электродинамические структуры, обеспечивающие необходимые замедления СВЧ-волны.

По-видимому, идею о возможности создания полупроводникового аналога лампы бегущей волны (ЛБВ) впервые сформулировал Пирс в 1950 г. [2]. Теоретическому анализу этой задачи посвящена работа [3]. Результаты экспериментальной проверки возможности взаимодействия электронов проводимости с медленной волной в замедляющей системе, нанесенной на поверхность антимоноида индия и кремния, изложены ранее [4]. Однако наблюдавшиеся в опытах инкременты нарастания оказались существенно меньшими, чем это предсказывалось теорией.

Главными причинами слабого взаимодействия в системе являются: сильное спадание СВЧ-поля в поперечном направлении (влияние этого фактора усугубляется необходимостью введения изолирующего слоя между

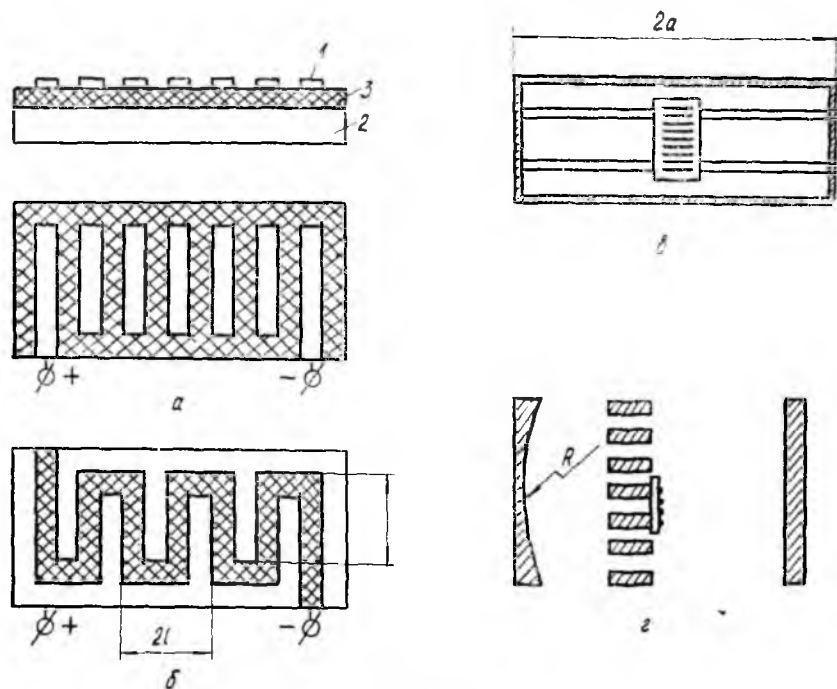


Рис. 1

замедляющей системой и проводящим слоем полупроводника); интенсивное затухание СВЧ-поля в продольном направлении, обусловленное потерями в поверхностном слое полупроводника, и в замедляющей системе. Этих недостатков в значительной мере лишен прибор (рис. 1), предложенный в работе [5].

В этом генераторе замедляющая система 1 наносится непосредственно на поверхность эпитаксиальной пленки арсенида галлия n -типа, выращенной на полуизолирующей подложке 2. Ламели замедляющей системы образуют омические контакты с поверхностью полупроводника. Поэтому, когда между соседними ламелями замедляющей системы, изолированными по постоянному току, прикладывается постоянное напряжение, превышающее пороговое, возбуждаются ганновские колебания, запитывающие замедляющую систему. В таком приборе в зависимости от периода замедляющей системы возможны асинхронный и синхронный режимы работы. В асинхронном режиме бегущая волна замедляющей системы не оказывает обратного

влияния на домены в диодах. При синхронизме волны с доменами появляется дополнительная положительная обратная связь, которая может повысить эффективность взаимодействия в системе.

Так как время прохождения доменов в парциальном диоде Ганна примерно равно периоду генерируемых колебаний, для обеспечения синхронизма с волной сдвиг фазы на периоде замедляющей системы должен соответствовать 2π . Это условие обеспечивается на одной из пространственных гармоник нулевого вида колебаний. Такой вид колебаний можно возбудить в замедляющей системе, помещенной в резонатор при дифракции его квазиплоской волны на ламелях замедляющей системы, аналогично тому, как это происходит в электровакуумных приборах типа ладертрон, оротрон, ГДИ. Длина волны генерируемых колебаний в этом случае определяется резонансной частотой колебательного контура.

Таким образом, рассматриваемый полупроводниковый генератор представляет собой N последовательно по СВЧ-полю включенных генераторов Ганна, связанных с внешним резонатором посредством быстрой, отрывающейся волны замедляющей системы. Важным достоинством описываемого генератора является отсутствие затухания волн вдоль замедляющей системы, поскольку групповая скорость в данном направлении равна нулю. С точки зрения подключения замедляющей системы к источнику питания возможны два варианта, соответствующие последовательному или параллельному включению диодов. В первом случае замедляющую систему можно выполнить в виде разомкнутой лестничной системы (рис. 1,а). Для параллельного включения системы можно использовать встречно-штыревую систему (рис. 1,б).

Преимуществом последней является низковольтность и большая надежность, так как выход из строя нескольких диодов не приведет к выходу из строя генератора. Кроме того, при параллельном подключении диодов менее жесткие требования предъявляются к однородности полупроводниковой пленки, в то время как в случае последовательного включения диодов, имеющих разброс по сопротивлению, часть диодов может вообще не работать.

Для реализации режима синхронного взаимодействия электронов дрейфа и медленной волны в замедляющей системе и связи с резонатором на быстрой, «отрывающейся волне» период системы должен определяться из соотношения $c/v_n = n\lambda/l$, где c , v_n — скорость света и n -й пространственной гармоники; l — период замедляющей системы.

В описываемых далее экспериментах использовались замедляющие системы с параметрами $s = 0,4$; $0,8$ мм; $l = 0,018$ мм. Встречно-штыревая система формировалась на эпитаксиальной пленке GaAs, выращенной на полуизолирующей подложке. Применялись два варианта пленок — с контактным слоем и без него. В обоих случаях ламели образовывали омические контакты с эпитаксиальной пленкой. Профиль замедляющей системы формировался методом фотолитографии.

Исследования выполнены в волноводном и открытом резонаторах (рис. 1,в, г). В волноводный резонатор трехсантиметрового диапазона параллельно широкой стенке волновода вводились два бруса высотой $h \ll \lambda/2$, на которых располагалась полупроводниковая пленка с замедляющей структурой. Брусья были изолированы по постоянному току от волновода, по ним подавалось напряжение смещения на структуру. Режим исследования импульсный, длительность импульса 2 мкс, частота повторения 500—1000 Гц.

Зависимость частоты и генерируемой мощности исследованных пленок от положения короткозамыкающего поршня показана на рис. 2,а. Там же представлена расчетная зависимость резонансной частоты волноводного контура от его длины L . Расчетные и экспериментальные кривые совпадают только в начале зоны генерации, в дальнейшем наклон экспериментальной зависимости меньше, чем расчетной. Это может быть обусловлено затягиванием генерируемого сигнала на частоте внутреннего резонанса в системе. Полученные мощности составляют 50 мВт в импульсе. Такой сравнительно

низкий уровень мощности обусловлен, по-видимому, неоптимальной геометрией системы, а также большим контактным сопротивлением.

Описываемые полупроводниковые структуры испытывались также в открытом резонаторе восьмимиллиметрового диапазона, между зеркалами которого находилась дифракционная решетка [4]. Полупроводниковая пленка располагалась на двух брусках решетки так, что штыри замедляющей структуры были перпендикулярны к электрическому полю волны в резонаторе. Наблюдались два режима работы, отличавшиеся напряжением питания и частотой генерируемых колебаний. Один из них возбуждался при напряжениях смещения $7 < u < 12$ В. Колебания с частотой 37 ГГц были слабо связаны с открытым резонатором и излучались из решетки даже в отсутствие зеркал. Во втором, более низковольтном режиме ($5 < u < 7$ В) частота колебаний контролировалась открытым резонатором и колебания срывались при внесении в резонатор рассеивающего тела. В этом режиме

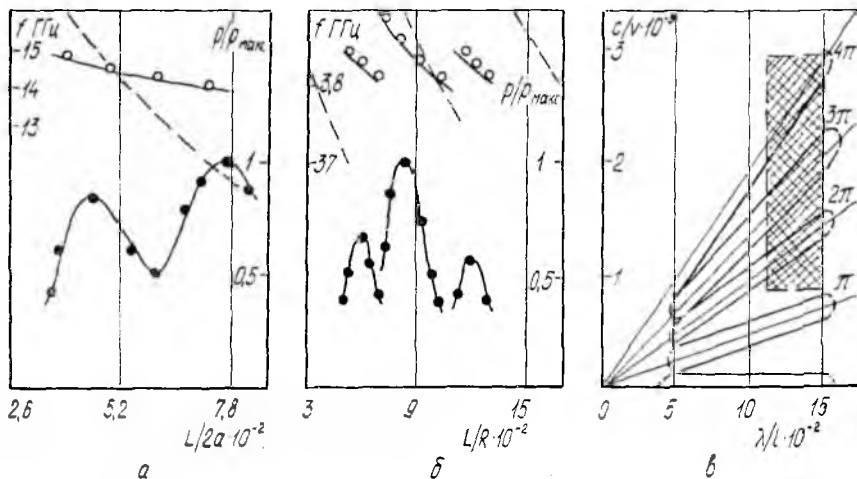


Рис. 2

генерировались колебания с частотой 38—39 ГГц и мощностью примерно 1 мВт. Зависимость частоты и мощности от расстояния между зеркалами дана на рис. 2, б.

Вопрос о реализации синхронизма между доменами Ганна и медленными волнами в замедляющей системе сложен. На рис. 2, а показана дисперсионная зависимость $\frac{c}{v_n} \left(\frac{\lambda}{e} \right)$ для первых четырех пространственных гармоник, полученная по формулам [5]

$$\frac{c}{v_n} = \frac{s}{l} \sqrt{\frac{\epsilon_0 + 1}{2}} + m \frac{l}{2},$$

где $m = \pm 1, \pm 2, \dots$, с учетом диэлектрической постоянной полупроводника ϵ_0 и того обстоятельства, что замедляющая система граничит со средой с $\epsilon = 1$.

Отсутствие информации о скорости доменов в системе затрудняет получение ответа на вопрос, находится ли наблюдаемое излучение в синхронизме с какой-либо из медленных волн в системе. Поэтому можно указать лишь область параметров (штриховка на рис. 2, в), где такой синхронизм может иметь место. По оси абсцисс она ограничена длинами волн, генерируе-

мыми в системе, по оси ординат — скоростями дрейфа, характерными для электрических полей, реализуемых в работающем диоде Ганна.

Проведенные эксперименты являются предварительными работами, направленными на отыскание путей реализации распределенного взаимодействия в полупроводниковых структурах. Можно надеяться, что дальнейшие исследования описанной системы и оптимизация ее параметров позволят создать мощные полупроводниковые СВЧ-генераторы.

Список литературы: 1. *Взаимодействие* электронного пучка с поверхностными волнами в полупроводниковой плазме / А. И. Бородкин, В. М. Яковенко, Г. Я. Левин, Ю. В. Майстренко // *Физика твердого тела*. — 1970. — 12, № 5. — С. 1515—1520. 2. *Митсуо К., Шиого К.* Перестраиваемый полупроводниковый генератор СВЧ // *Радиотехника СВЧ*. — 1973. — № 4. — С. 1—20. 3. *Викулов И. В., Тагер А. С.* Взаимодействие дрейфующих носителей тока с бегущим электрическим полем при наличии соударений // *Радиотехника и электроника*. — 1969. — 14, № 11. — С. 1977—1986. 4. *Полупроводниковый генератор миллиметрового диапазона с квазиоптической резонаторной системой* / А. И. Бородкин, Б. М. Булгаков, В. А. Матвеева и др. // *Письма в журн. техн. физики*. — 1979. — № 5. — С. 285—288. 5. *Тараненко З. И., Трохименко Я. К.* Замедляющие системы. — К. : Техніка, 1965. — 310 с.

Поступила в редколлегию 24.05.85