

К. т. н. М. С. АФАНАСЬЕВ, д. ф.-м. н. А. Ю. МИТЯГИН,
д. ф.-м. н. Г. В. ЧУЧЕВА

Россия, г. Москва, ИРЭ РАН им. В. А. Котельникова
E-mail: alexandr-mityagin@yandex.ru

Дата поступления в редакцию
12.04 2010 г.

Оппонент к. т. н. Э. Н. ГЛУШЕЧЕНКО
(НПП «Сатурн», г. Киев)

ПЕРЕСТРАИВАЕМАЯ ЛИНИЯ ЗАДЕРЖКИ СИГНАЛА СВЧ-ДИАПАЗОНА НА ОСНОВЕ СЕГНЕТОЭЛЕКТРИЧЕСКИХ И АЛМАЗНЫХ ПЛЕНОК

Рассмотрен принцип создания широкополосной миниатюрной линии задержки сигнала СВЧ-диапазона на основе сегнетоэлектрических и алмазных пленок. Разработана технология получения пленок на кремниевых подложках.

Одним из основных функциональных узлов радиоэлектронной аппаратуры являются линии задержки (ЛЗ). Они выполняются либо на базе отрезков радиочастотных кабелей, и тогда их подстройка осуществляется укорочением длины кабеля, что является длительной и трудоемкой операцией, либо на ферритах с фиксированным временем задержки (типа ЛЗА 511-8). Такие ЛЗ не удовлетворяют требованиям по вносимым потерям, а также по массогабаритным характеристикам. Существуют управляемые ЛЗ на основе полупроводниковых варикапов, но они ограничены уровнем проходного сигнала. ЛЗ на поверхностно-активных волнах ограничены диапазоном частот до 1,0 ГГц, имеют большие прямые потери и не могут быть перестраиваемыми.

Стремление получить более высокие качественные и технические характеристики ЛЗ естественным образом привело к тому, что в качестве активного материала для ЛЗ были выбраны сегнетоэлектрики, имеющие чрезвычайно высокие значения диэлектрической проницаемости (более 2000) и обладающие спонтанной поляризацией, величина которой может изменяться под действием физических полей (электрических, магнитных, тепловых) и механических деформаций. Это открывает возможность для создания электрически перестраиваемой ЛЗ.

Диэлектрическая проницаемость сегнетоэлектрика, например титаната бария-стронция ($Ba_xSr_{1-x}TiO_3$), находящегося в параэлектрическом состоянии, определяется как

$$\epsilon = \frac{\epsilon_{00}}{\left[(\xi^2 + \eta^3)^{1/2} + \xi \right]^{2/3} + \left[(\xi^2 + \eta^3)^{1/2} - \xi \right]^{2/3} - \eta},$$

$$\xi = \sqrt{\left(\frac{E_{dc}}{E_N} \right)^2 + \xi_s^2},$$

$$\text{для } x \leq 0,5 \quad \eta(T) = \frac{\theta_F}{T_c} \sqrt{\frac{1}{16} + \left(\frac{T}{\theta_F} \right)^2} - 1,$$

$$\text{для } x > 0,5 \quad \eta(T) = \frac{T}{T_c - 1},$$

$$\epsilon_{00} = C/T_c, \quad E_N = 2D_N / [\epsilon_0 (3\epsilon_{00})^{3/2}],$$

где T — температура, при которой используется материал;

E_{dc} — напряженность постоянного поля, приложенного к материалу;

T_c — температура Кюри;

ϵ_0 — электрическая постоянная;

ϵ_{00} — постоянная Кюри-Вейса;

C — коэффициент;

D_N — статическая электрическая индукция в материале, $D_N = 4-7$ Кл/м² (слабо зависит от концентрации бария x);

θ_F — дебаевская температура колебаний подрешеток кристалла, ответственных за сегнетоэлектрическую поляризацию, для $Ba_xSr_{1-x}TiO_3$ принята $\theta_F = 175$ К;

ξ_s — мера дефектности материала.

С достаточной точностью можно положить, что

$$T_c(x) = 40 + 350x,$$

$$C(x) = (0,9 + 0,6x^2) \cdot 10^5.$$

Следует отметить, что чем выше кристаллографическое совершенство материала, тем меньше величина параметра ξ_s . Для совершенных монокристаллов или высококачественных объемных образцов керамики $Ba_xSr_{1-x}TiO_3$ $\xi_s = 0,015-0,1$. Для пленок на диэлектрической подложке при современном уровне технологии их изготовления $\xi_s = 0,5-1,5$.

Из расчетов следует, что диэлектрическая проницаемость сегнетоэлектриков может достигать примерно 10000. Такое высокое значение диэлектрической проницаемости способствует увеличению коэффициента перестройки емкости при приложении внешнего поля, что открывает возможность создания широкополосной электронно-управляемой миниатюрной ЛЗ с использованием сегнетоэлектрических материалов.

Конструкция линии задержки

ЛЗ представляет собой микрополосковую линию (МПЛ) передачи СВЧ-сигнала с сосредоточенными на ней планарными конденсаторами переменной емкости. Изменяя емкость конденсаторных элементов

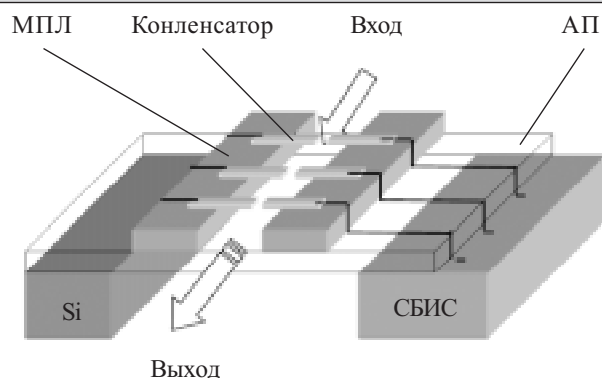


Рис. 1. Схема конструкции линии задержки

с помощью электрического поля, можно задавать время задержки сигнала и управлять им в такой ЛЗ. Волновое сопротивление ЛЗ составляет 50 Ом. Схема конструкции ЛЗ приведена на **рис. 1**.

Для увеличения рабочей частоты ЛЗ конденсаторы и МПЛ изготавливаются из наноразмерных пленок $Ba_xSr_{1-x}TiO_3$ состава $x=0,8$, нанесенных на подложку со сформированной на ней СБИС, которая служит системой управления ЛЗ. Оптимальным материалом для подложки служит кремний. Для снижения потерь и увеличения «проходной» мощности СВЧ-сигнала ЛЗ формируется на тонкой алмазной пленке (АП), предварительно нанесенной на кремниевую подложку. Требуемая задержка осуществляется за счет программируемого включения с помощью СБИС одного или нескольких конденсаторных элементов.

Основные физические свойства пленок $Ba_{0,8}Sr_{0,2}TiO_3$, определяющие возможность их практического применения, следующие:

- высокая диэлектрическая проницаемость (700—800);
- низкие потери СВЧ-сигнала — в структурно совершенных пленках тангенс угла диэлектрических потерь не превышает 10^{-3} на частотах до 100 ГГц (в объемной керамике он равен 10^{-1} на 1,0 ГГц);
- возможность управлять диэлектрической проницаемостью, а следовательно, обеспечивать величину коэффициента управления емкостью конденсаторов на уровне 2,5—3,0 в слабых электрических полях (при $U \leq 15$ В);
- низкая постоянная времени переключения, что позволяет осуществлять в течение 10^{-9} с перестройку времени задержки линии;
- высокое напряжение пробоя (не менее 10^6 В/см) позволяет использовать большие биполярные напряжения смещения, что открывает возможность программируемого управления мощностью.

К числу преимуществ алмазных пленок можно отнести высокие механические характеристики и теплопроводность (в 5 раз выше, чем у меди) в сочетании с высокой электрической прочностью и низкой диэлектрической проницаемостью (около 5).

Для создания ЛЗ была разработана технология получения сегнетоэлектрических и алмазных пленок.

Методика формирования сегнетоэлектрических пленок

Сегнетоэлектрические пленки формировались методом высокочастотного (ВЧ) реактивного распыления в атмосфере кислорода [1], обладающим широкими возможностями по изменению режимов роста (регулируются температура, давление кислорода, скорость роста, геометрия размещения подложки относительно ВЧ-электрода). Основным преимуществом метода является возможность напыления структурно-совершенных пленок оксидов металла с сохранением стехиометрии по кислороду.

Схема экспериментальной установки напыления представлена на **рис. 2**. Камера напыления 1 представляет собой цилиндр из нержавеющей стали, на основании которого закреплен внешний ВЧ-электрод. Для устранения влияния вибрации камера закреплялась на голографическом столе. Вакуумная система соединялась с насосом откачки сиффоном, подающим вибрацию механического форвакуумного насоса. Кислород подавался из баллона через ротаметр и прокачивался через камеру со скоростью $0,4 \pm 0,01$ л/мин. Горячепрессованная керамическая поликристаллическая мишень 2 состава $Ba_{0,8}Sr_{0,2}TiO_3$ диаметром 47 мм и толщиной 3,5 мм приклеивалась к диэлектрическому окну 8 из оксида бериллия диаметром 60 мм клеем К 400 с наполнителем из нитрида бора. Клей обеспечивал хорошую теплопроводность между катодом и мишенью, что защищало последнюю от перегрева и растрескивания. Для наблюдения за процессом напыления использовалось кварцевое окно 6.

Подложка 3 закреплялась на резистивном нагревателе 4 с платиновой спиралью. Нагреватель с подложкой можно перемещать относительно мишени совместно с ней с помощью манипулятора, снабженного вакуумным уплотнением 5. В качестве источника ВЧ-разряда использовалось высокочастотное устройство

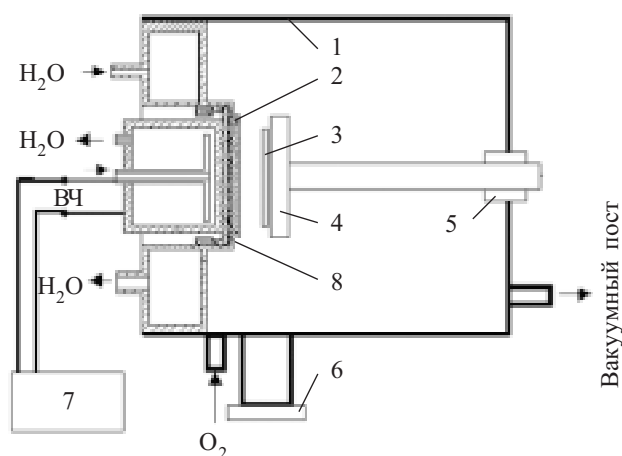


Рис. 2. Схема установки для напыления сегнетоэлектрических пленок:

- 1 — камера; 2 — сегнетоэлектрическая мишень; 3 — подложка; 4 — керамический нагреватель; 5 — вакуумное уплотнение; 6 — окно для наблюдения за процессом напыления; 7 — блок питания ВЧ-катода; 8 — диэлектрическое окно

УВ-1. Переменное напряжение частотой 13,56 МГц подводилось к ВЧ-электроду от трехкаскадного генератора. Задающий кварцевый генератор с первым каскадом усиления собирался в отдельном корпусе. Буферный усилитель был собран на четырех лампах ГУ-50, а выходной каскад — на двух лампах ГУ-80. В качестве согласующего устройства использовался «П»-контур с регулируемой индуктивностью и емкостями. Управление напряжением, подводимым к ВЧ-электроду, проводилось путем изменения емкости регулировочного конденсатора в согласующем устройстве.

Методика напыления пленок заключалась в следующем. На нагревателе закрепляли подложку при помощи держателя, выполненного из нержавеющей стали толщиной 0,3 мм, герметично закрывали рабочую камеру и откачивали воздух форвакуумным насосом Trivas D30A до остаточного давления 10 Па. Затем в камеру подавали кислород марки ОСЧ до достижения давления 60 Па. Контроль давления осуществлялся автоматически с помощью системы регулятора расхода газа РРГ-3 с точностью $\pm 0,1$ Па. По достижении необходимого давления включался блок питания нагревателя. Контроль и поддержание температуры подложки осуществлялись автоматически при помощи микропроцессорного измерителя ТРМ-101 с точностью $\pm 5^\circ\text{C}$. Подложку нагревали до $400\text{--}420^\circ\text{C}$ и выдерживали 5 мин. Далее включали блок питания ВЧ-генератора, и в рабочем объеме между мишенью и подложкой загоралась ВЧ-плазма в кислороде. Регулировка мощности ВЧ-плазмы осуществлялась непосредственно на задающем кварцевом генераторе. Нагреватель подложки оставался включенным до конца процесса напыления. Температуру подложки в процессе напыления можно регулировать в интервале $500\text{--}900^\circ\text{C}$.

Процесс получения пленок состоял из двух этапов. На первом этапе проводили напыление в кислороде, которое продолжалось $2\text{--}10$ мин в зависимости от требуемой толщины пленки. Второй этап заключался в термообработке пленки в атмосфере кислорода. Для этого выключали ВЧ-генератор, закрывали вакуумный вентиль откачки, выключали нагреватель подложки и увеличивали давление кислорода в камере до 10^3 Па. Далее подложку охлаждали до комнатной температуры в течение 2 часов.

Полученные сегнетоэлектрические пленки состава $\text{Ba}_{0,8}\text{Sr}_{0,2}\text{TiO}_3$ имели следующие параметры: диэлектрическая проницаемость — 720, тангенс угла диэлектрических потерь — 10^{-3} на частотах до 100 ГГц, коэффициент управления емкостью конденсаторов — 2,5, напряжение пробоя — не менее 10^6 В/см.

Методика формирования алмазных пленок

Для снижения потерь и увеличения «проходной» мощности СВЧ-сигнала ЛЗ формировались на алмазных пленках. Пленки наносились на кремниевую подложку методом химического напыления (chemical vapor deposition, CVD). Данный метод позволяет эффективно управлять параметрами процесса формирования пленок, а именно: изменять остаточное давление в диапазоне от $6 \cdot 10^{-3}$ до $1 \cdot 10^{-4}$ мм рт. ст., тем-

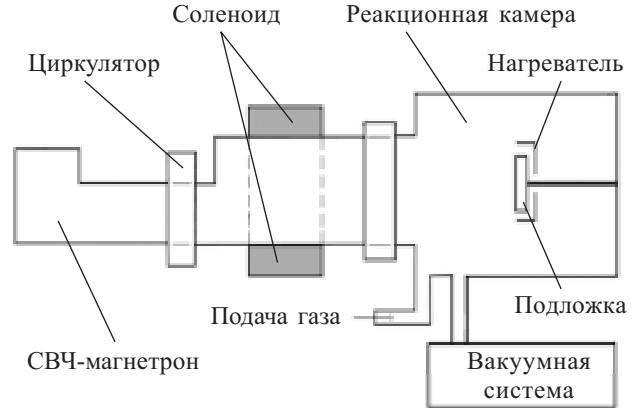


Рис. 3. Схема установки формирования алмазных пленок в плазме газового разряда низкого давления

пературу подложки от 500 до 900°C , мощность излучения газового разряда от 50 до 300 Вт, использовать различные газовые и жидкие реакционные среды.

Технология выращивания пленок заключается в разложении газовой смеси в СВЧ-разряде при пониженном давлении и температуре $500\text{--}900^\circ\text{C}$. Для выращивания пленок была разработана и изготовлена установка, схема которой представлена на рис. 3.

Установка состоит из реакционной камеры, вакуумной системы откачки, системы подачи реакционной смеси, магнетрона, соленоида, циркулятора. Реакционная камера представляет собой цилиндр, внутри которого установлен нагреваемый держатель подложки, передвигающийся вдоль реакционной камеры. Температура подложки контролируется с точностью $\pm 3^\circ\text{C}$. Вакуумная система состоит из последовательных форвакуумного и диффузионного насосов и позволяет создавать остаточное давление в реакционной камере не хуже $5 \cdot 10^{-5}$ мм рт. ст. Контроль остаточного давления в камере осуществляется вакуумметром ВИТ-3. Система подачи реакционной смеси представляет собой два вентиля, соединенных параллельно, которые имеют общий выход в реакционную камеру, что позволяет одновременно работать с несколькими видами рабочих сред. В качестве источника излучения используется магнетрон М-105 с частотой $2,45$ ГГц и максимальной мощностью 300 Вт с блоком управления и циркулятор, который гасит отраженную волну для предотвращения попадания отраженной мощности в магнетрон. На расстоянии 80 мм от диэлектрического окна в реакционной камере находится зона газового разряда. Для стабилизации газового разряда используется соленоид, создающий магнитное поле с индукцией $2,5$ Тл.

Методика напыления состояла в следующем. Перед началом процесса осаждения алмазных пленок воздух из реакционной камеры откачивался до остаточного давления $7 \cdot 10^{-5}$ мм рт. ст. с помощью вакуумной системы. Во время откачки подложка разогревалась до заданной температуры, которая контролировалась закрепленной на ней термопарой. Время напыления в зависимости от требуемой толщины растущей пленки варьировалось от 50 до 120 мин. Пленки осаждались из газовой смеси $\text{CH}_4\text{--H}_2\text{--Ar}$ на крем-

ниевые подложки марки КДБ-12 с ориентацией [100] при температуре 500—900°С. Во всех проводимых экспериментах остаточное давление составляло от $1 \cdot 10^{-3}$ до $3 \cdot 10^{-3}$ мм рт. ст., мощность излучения — 200 Вт.

Полученные АП имели теплопроводность около 6,7 Вт/(см·К), диэлектрическую проницаемость около 5.

Используя разработанные технологии получения сегнетоэлектрических и алмазных пленок, были созданы экспериментальные макеты линий задержки. Прямые потери СВЧ-сигнала в ЛЗ составили не более 5,0 дБ в диапазоне 26—46 ГГц. Реализация низких потерь достигалась путем изготовления МПЛ и планарных конденсаторов из пленок $\text{Ba}_{0,8}\text{Sr}_{0,2}\text{TiO}_3$ толщиной 70—100 нм, а также за счет формирования

МПЛ на алмазоподобной пленке толщиной 2—3 мкм, не шунтирующей СВЧ-сигнал в МПЛ и обладающей высокой теплопроводностью.

Результаты исследований показали, что по сравнению с существующими ЛЗ экспериментальные макеты линий на основе сегнетоэлектрических и алмазных пленок позволяют увеличить диапазон рабочих частот до 80,0 ГГц, снизить прямые потери сигнала до 1,0 дБ, довести увеличение предельной мощности входного сигнала до 3,0 дБ, устанавливать время задержки сигнала от 0,1 до 1,0 мкс.

ИСПОЛЬЗОВАННЫЕ ИСТОЧНИКИ

1. Афанасьев М. С., Иванов М. С. Особенности формирования тонких сегнетоэлектрических пленок $\text{Ba}_x\text{Sr}_{1-x}\text{TiO}_3$ на различных подложках методом высокочастотного распыления // ФТТ.— 2009.— Т. 51, вып. 7.— С. 1259—1262.