

УДК 537.52

## РАЗРАБОТКА ВОЛНОВОДНЫХ ПОЛУПРОВОДНИКОВЫХ ПЕРЕКЛЮЧАТЕЛЕЙ СВЕРХВЫСОКОЧАСТОТНОГО ИЗЛУЧЕНИЯ ДИАПАЗОНОВ 70 И 260 ГГц

*М. Л. Кулыгин<sup>1\*</sup>, В. И. Белоусов<sup>1</sup>, Г. Г. Денисов<sup>1,2</sup>, А. А. Вихарев<sup>1</sup>,  
В. В. Корчагин<sup>1</sup>, А. В. Кузин<sup>1</sup>, Е. А. Новиков<sup>1</sup>, М. А. Хозин<sup>1</sup>*

<sup>1</sup> Институт прикладной физики РАН, г. Нижний Новгород;

<sup>2</sup> Нижегородский госуниверситет им. Н. И. Лобачевского, г. Нижний Новгород, Россия

Разработаны, изготовлены и экспериментально исследованы действующие макеты переключателей сверхвысокочастотного (СВЧ) излучения диапазонов 70 и 260 ГГц, управляемых импульсами оптического лазерного излучения. Приведены результаты их численного моделирования методом конечных разностей во временной области (FDTD) и конструктивные параметры действующих макетов. Быстродействие переключателей составляет 1 нс, диапазон перестройки по частоте коммутируемого СВЧ излучения составляет около 10 %. Экспериментально продемонстрирован процесс переключения с использованием дешёвого полупроводникового оптического лазера (длина волны 532 нм, мощность в непрерывном режиме 200 мВт), при частоте коммутируемого излучения 266,68 ГГц.

### ВВЕДЕНИЕ

В настоящей работе рассматривается волноводный полупроводниковый переключатель СВЧ излучения, предназначенный для модуляции и коммутации потока энергии когерентного СВЧ излучения с сохранением взаимной когерентности волновых пакетов на выходе. Упрощённый принцип работы переключателя, известный с 1950 года [1], проиллюстрирован на рис. 1. Активным элементом переключателя является пластина из полупроводника, например кремния, Si.

В исходном состоянии, при комнатной температуре и отсутствии внешних полей, полупроводник проявляет электродинамические свойства, подобные диэлектрику с низкими омическими потерями. Входной поток излучения из источника СВЧ электромагнитного поля проходит через полупроводниковую пластину на выход переключателя практически без изменений. Согласование для нужной частоты достигается подбором толщины пластины  $d$ . Управление переключением осуществляется с помощью импульсов оптического излучения, индуцирующего фотопроводимость в тонком слое на границе полупроводника. В результате этого полупроводник приобретает электропроводность, близкую к электропроводности металлов. При этом входной поток энергии СВЧ излучения практически полностью отражается, т. е. происходит переключение. Появление индуцированной фотопроводимости и её релаксация в отсутствие внешнего оптического излучения — весьма быстрый процесс с характерными временами порядка микросекунд (для кремния) и даже наносекунд (для арсенида галлия) [2].

Управляемый полупроводниковый элемент может являться частью резонансной волноводной или квазиоптической конструкции, что теоретически позволяет работать при частотах в десятки

\* kmaxim@appl.sci-nnov.ru

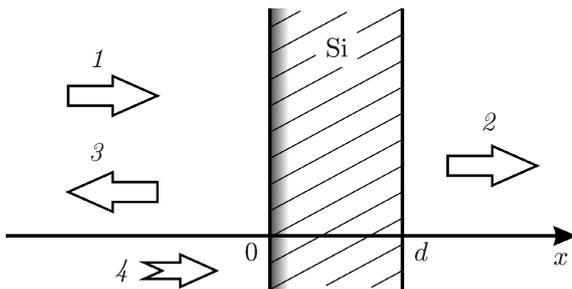


Рис. 1. Упрощённый принцип работы полупроводникового переключателя СВЧ излучения: 1 — входной источник СВЧ излучения, 2 — выходное СВЧ излучение, 3 — отражённое СВЧ излучение, 4 — излучение лазера

и сотни гигагерц, а также кило- и мегаваттных уровнях проходящей мощности СВЧ излучения без риска теплового разрушения и приемлемом уровне потерь. В качестве такой конструкции может быть выбран волноводный полосовой режекторный фильтр, подробно описанный в [3]. Главным достоинством такого фильтра является наличие единственного глубокого резонанса в широкой области частот. Этот резонанс позволяет существенно подавить входное излучение в некоторой узкой полосе частот (состояние «выключено»). Освещение лазером полупроводниковой пластины, входящей в состав резонатора, позволяет на некоторое время расстроить резонанс обратимым способом (состояние «включено»). Однако добавление полупроводниковой пластины в конструкцию фильтра существенно меняет все количественные параметры: частоту, добротность, количество резонансов и диапазон перестройки частоты. Аналитические оценки геометрии и численные расчёты амплитудно-частотной характеристики режекторного фильтра [3] не годятся для переключателя (т. е. управляемого режекторного фильтра). Основная причина этого в том, что любая, даже бесконечно тонкая пластина полупроводника имеет две границы раздела «среда–воздух», которые значительно отражают электромагнитное поле. Кроме того, толщина даже сравнительно тонкой (порядка 100 мкм, меньшую толщину не имеет смысла рассматривать из соображений прочности) пластинки арсенида галлия с диэлектрической проницаемостью  $\epsilon = 12,9$  на частоте 70 ГГц оказывается порядка длины волны поля в диэлектрике. Это ещё сильнее меняет частоту резонанса по сравнению с фильтром без пластины. Переключатель перестраивается по частоте механическим винтом примерно на 10 %, что в 10 раз шире диапазона перестройки фильтра [3].

Конструкция переключателя представлена на рис. 2. На входе и выходе используется стандартный прямоугольный волновод. Для частотного диапазона 70 ГГц его размеры составляют  $3,6 \times 1,8$  мм, для 260 ГГц —  $0,864 \times 0,432$  мм (стандарт IEA WR3). Полупроводниковая пластина из арсенида галлия установлена вблизи верхнего (рис. 2) отверстия закрытого канала резонатора. Излучение лазера через противоположный, нижний (рис. 2), закрытый канал падает на нижнюю по схеме грань пластинки, проходя сквозь резонатор. Оптимальная толщина пластины составляет около 200 мкм [4], в эксперименте при частоте 70 ГГц была использована пластина с толщиной 174 мкм [4, 5], при частоте 260 ГГц — 210 мкм. Винт механической перестройки частоты расположен над полупроводниковой пластиной.

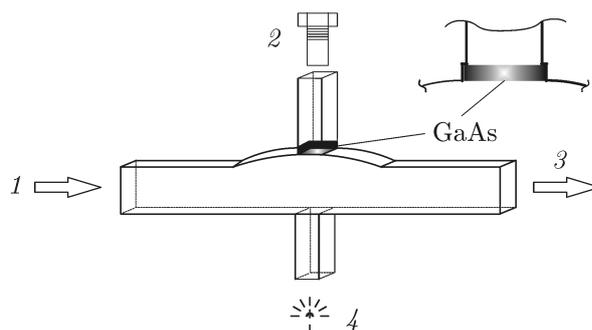


Рис. 2. Конструкция переключателя СВЧ излучения: 1 — входное СВЧ излучение, 2 — винт перестройки, 3 — выходное СВЧ излучение, 4 — лазер

## 1. РАСЧЁТ МЕТОДОМ КОНЕЧНЫХ РАЗНОСТЕЙ ВО ВРЕМЕННОЙ ОБЛАСТИ (FDTD)

При расчёте и оптимизации геометрии переключателя используется модификация известного метода численного интегрирования уравнений Максвелла FDTD [6–8]. Волноводные переключатели используют низшие моды прямоугольных волноводов с нулевым индексом по одной из поперечных координат. Поэтому по координатам задача является двумерной. В системе уравнений Максвелла (1а), (1б) учитывается электрический ток (1в), выраженный через суммарную подвижность обобщённых носителей заряда  $\mu$  в полупроводниковой пластине и их концентрацию  $N$ :

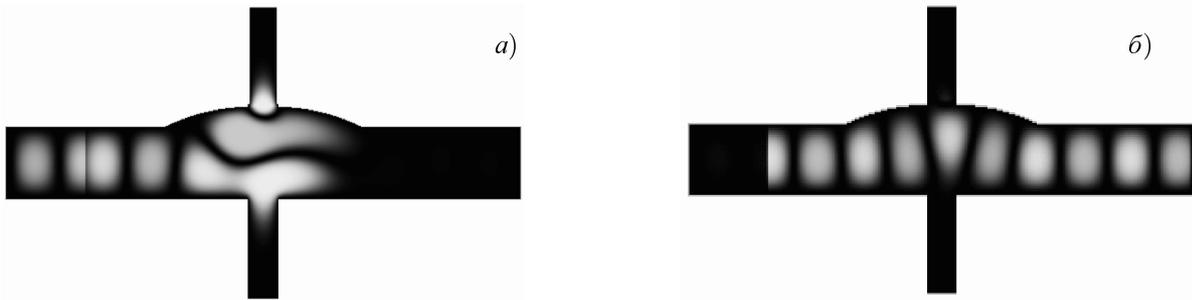


Рис. 3. Распределение поля в переключателе: *a* — в резонансе, состояние «закрыт», *б* — вне резонанса, состояние «открыт»

$$\operatorname{rot} \mathbf{E} = -\frac{1}{c} \frac{\partial \mathbf{H}}{\partial t}, \quad (1a)$$

$$\operatorname{rot} \mathbf{H} = \frac{\varepsilon}{c} \frac{\partial \mathbf{E}}{\partial t} + \frac{4\pi}{c} \mathbf{j}, \quad (1б)$$

$$\mathbf{j} = eN(t, \mathbf{r})\mu\mathbf{E}. \quad (1в)$$

Для упрощения численной модели носители заряда в полупроводнике обезличены. Для расчёта их концентрации используется нестационарное уравнение, описывающее эффекты диффузии, релаксации и возбуждения фотопроводимости внешним лазерным излучением:

$$\frac{\partial N}{\partial t} = D \Delta N + g(\mathbf{r}, t) - G_1 (N - N_p). \quad (2)$$

Здесь  $D$  — коэффициент амбиполярной диффузии в полупроводнике [2], коэффициент играющей основную роль релаксации первого порядка  $G_1$  вычисляется в предварительном эксперименте по релаксации люминесценции образца полупроводника,  $N_p$  — равновесная концентрация носителей в используемом полупроводнике при комнатной температуре [2]. На границе полупроводника отсутствует поток частиц, что соответствует условию  $\nabla N = 0$ . Внутренний фотоэффект, т. е. возрастание во времени концентрации носителей заряда при поглощении света веществом (с учётом затухания излучения лазера вглубь полупроводника) описывается уравнением

$$g(r_{\perp}, t) = i \exp(-\alpha r_{\perp}) \theta(t - t_0, \tau). \quad (3)$$

Константа фотоэффекта даётся выражением  $I = \alpha W_{\text{имп}} \eta / (S \tau W_{\text{кв}})$ , где обратная глубина проникновения  $\alpha$  соответствует характерной ширине слоя фотопроводимости в полупроводнике при заданной длине волны лазерного излучения (обычно используются оптические или инфракрасные лазеры),  $W_{\text{имп}}$  — энергия лазерного импульса,  $W_{\text{кв}}$  — энергия кванта,  $\tau$  — длительность импульса,  $\theta$  — степ-функция,  $r_{\perp}$  — расстояние до поверхности полупроводника. Типичная площадь пучка  $S$  составляет величину порядка  $1 \text{ мм}^2$ ,  $\eta$  — коэффициент полезного действия (КПД) фотоэффекта, на практике равный примерно 50 %.

Решения нестационарных нелинейных задач для одномерного переключателя приведены в [9, 10]. Типичное решение нелинейной нестационарной задачи, соответствующее двумерному переключателю, проиллюстрировано на рис. 3а. Он представляет собой диаграмму мгновенного распределения электрического поля в переключателе в состоянии «закрыт», т. е. когда поле на выходе равно нулю и сигнал через переключатель не проходит. В резонансе наблюдается стоячая волна, что достигается подбором геометрии переключателя под заданную частоту. Подавая

импульс управляющего лазерного излучения (или наоборот, выключая лазер и дожидаясь релаксации фотопроводимости), получаем противоположное состояние переключателя «открыт», рис. 3б. В этом состоянии входной сигнал проходит через переключатель на выход практически без изменений, резонанс разрушен. Глубина резонанса, т. е. ослабление мощности на выходе по отношению к мощности на входе в состоянии «закрыт», составляет величину порядка 30 дБ при добротности  $Q \approx 300$  с учётом омических потерь. В состоянии резонанса в центре резонатора наблюдаются три пучности поля по вертикальной оси резонатора аналогично случаю режекторного фильтра [3]. Пластика из арсенида галлия находится на пересечении резонатора и верхнего отрезка закритического волновода (рис. 3а). Быстродействие переключателя составляет величину порядка 1 нс, что определяется временем релаксации фотопроводимости в полупроводнике и добротностью резонатора [11].

Задача оптимизации переключателя сводится к оптимизации его амплитудно-частотной характеристики. Основным критерием оптимальной амплитудно-частотной характеристики  $A(f)$  является наличие глубокого уединённого резонанса в заданной рабочей полосе частот  $\Delta f$ . Метод FDTD позволяет получить динамику компонент электромагнитного поля в поле вещественных чисел. Это позволяет получить амплитудно-частотную характеристику переключателя за один расчёт. Для получения минимальной численной ошибки её нахождения в заданной полосе частот при оптимальном времени расчёта на вход переключателя следует подать ограниченный во времени импульс, преимущественно содержащий нужные нам частоты. Начальные условия при времени  $t = 0$  для полей и токов нулевые. Импульс обычно имеет гауссову огибающую и синусоидальное заполнение на центральной частоте  $f_0$  рабочей полосы:

$$E_{\text{input}}(\mathbf{r}_{\perp}, t) = E_{\perp \text{TE}_{10}}(\mathbf{r}_{\perp}) \sin(2\pi f_0 t) \exp[-4\pi^2 \Delta f^2 (t - t_0)^2]. \quad (4)$$

Обрезка огибающей в начальный момент времени  $t = 0$  выбрана по уровню  $\exp(-2)$ . Из этих соображений определяется время наступления максимума гауссовой огибающей  $t_0$ . Центральную частоту рабочей полосы  $f_0$  желательно выбрать вблизи центральной частоты метода FDTD [6, 8] для обеспечения минимальной возможной ошибки расчёта.

Амплитудно-частотная характеристика переключателя в стационарном состоянии определяется как отношение фурье-образа интеграла интенсивности сигнала на выходе к мощности сигнала на входе в зависимости от частоты. Интегрирование ведётся по поперечным сечениям на входе и выходе переключателя. За счёт одномодового волновода на входе и выходе амплитудно-частотная характеристика записывается наиболее простым образом:

$$A(f) = \left| \int_0^{t_{\text{max}}} \int_{S_{\perp \text{output}}} [\mathbf{E}, \mathbf{H}] d\mathbf{S}_{\perp} \exp(2\pi i f t) dt \right|^2 / \left| \int_0^{t_{\text{max}}} \int_{S_{\perp \text{input}}} [\mathbf{E}, \mathbf{H}] d\mathbf{S}_{\perp} \exp(2\pi i f t) dt \right|^2. \quad (5)$$

Согласно закону сохранения энергии на любой частоте в переключателе с омическими потерями

$$A(f) < 1. \quad (6)$$

Это неравенство служит также необходимым условием адекватности расчёта. Время окончания расчёта обычно выбирается экспериментально, т. к. в резонансной конструкции скорость затухания решения зависит от свойств исследуемого резонатора. Простейшими критериями правильного выбора времени окончания расчёта является отсутствие мелкой квазисинусоидальной модуляции амплитудно-частотной характеристики вблизи резонансов (так называемых артефактов расчёта) и соблюдение условия (6).

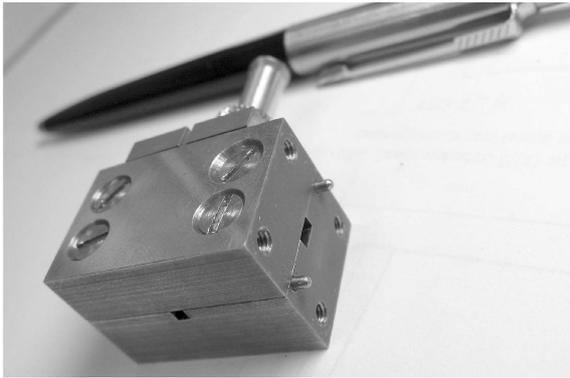


Рис. 4. Переключатель излучения с частотой 70 ГГц

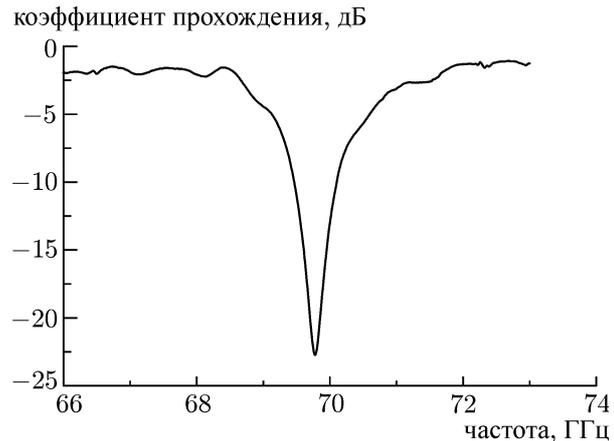


Рис. 5. Резонансная кривая переключателя излучения с частотой 70 ГГц

## 2. ПЕРЕКЛЮЧАТЕЛЬ ИЗЛУЧЕНИЯ С ЧАСТОТОЙ 70 ГГц

Внешний вид переключателя излучения с частотой 70 ГГц показан на рис. 4. Он собран из двух медных деталей с разрезом вдоль одной из широких стенок волновода. Одна деталь представляет собой гладкую крышку, на второй собраны все каналы переключателя. Несмотря на то, что с точки зрения омических потерь такая конструкция не является оптимальной, она относительно проста в изготовлении и стоит примерно в 2,5 раза дешевле оптимального аналога с традиционным разрезом пополам, т. е. посередине основного волноводного канала параллельно узкой стенке волновода. Как показали дальнейшие эксперименты, в частотном диапазоне вблизи 70 ГГц (и, следовательно, для более низких частот) простая в изготовлении конструкция с неоптимальным разрезом вполне работоспособна (рис. 4), тогда как в частотном диапазоне вблизи 260 ГГц (и, следовательно, выше) подобное упрощение неприемлемо: основной резонанс настолько мелкий, что его становится трудно различить на общем фоне значительных омических потерь.

Предварительный эксперимент с переключателем проводится без лазера, проверяются наличие резонанса в требуемой полосе частот, его глубина и добротность, а также диапазон перестройки частоты. Для переключателя излучения с частотой 70 ГГц наиболее точный эксперимент проведён на векторном частотно-панорамном комплексе MVNA (производство Франции), его результаты приведены на рис. 5. Глубина резонанса составила около  $-23$  дБ в диапазоне частот  $66 \div 72$  ГГц (с механической перестройкой винтом), что лишь на 7 дБ хуже расчётной глубины резонанса  $-30$  дБ для резонатора без разреза. Это оправдывает изготовление резонатора с неоптимальным разрезом в выбранном диапазоне частот и, как следствие, удешевление конструкции переключателя.

Основной эксперимент [4, 5] выполнен с использованием лазерного каскадного комплекса SpectraPhysics (производство США) — источника импульсов с длительностью 100 фс, частотой повторения 75,4 МГц, характерной энергией в каждом импульсе 10 нДж и длиной волны заполнения огибающей 780 нм. На выходе переключателя были получены импульсы-отклики на управляющее лазерное излучение со следующими параметрами: длительность фронта около 1 нс, длительность спада 2 нс, период повторения 13,6 нс (соответствует 75,4 МГц) и частота заполнения 70,3 ГГц. При подаче на вход переключателя когерентного излучения все волновые пакеты на выходе практически когерентны между собой, т. е. фазы высокочастотного заполнения во всех пакетах связаны. Таким образом, существенных фазовых искажений в коммутируемое

излучение переключатель не вносит. Это особенно важно для когерентной неразрушающей спектроскопии, при которой проводится облучение образцов излучением с минимальной мощностью с возможностью обзора в целом отрезке частот, тогда как использование когерентного излучения напрямую позволяет видеть изображение только на одной частоте. С переключателем область рабочих частот может быть достаточно широкой без снижения чувствительности когерентного спектрометра.

### 3. РАЗРАБОТКА ПЕРЕКЛЮЧАТЕЛЯ ИЗЛУЧЕНИЯ С ЧАСТОТОЙ 260 ГГц

В качестве исходного волновода для такого переключателя был выбран стандартный волновод IEA WR3 с размерами  $0,864 \times 0,432$  мм, обычно используемый для передачи одномодового излучения в полосе частот  $220 \div 330$  ГГц. Как вариант, с целью увеличения мощности коммутируемого сигнала, также рассмотрен стандартный волновод WR4 с размерами  $1,092 \times 0,546$  мм, обычно используемый для полосы частот  $170 \div 260$  ГГц. Типичный диапазон мощностей для нужд спектроскопии составляет от 0,01 до 40 Вт. Расчёт переключателя был выполнен методом FDTD, однако процедура оптимизации геометрии была автоматизирована, в отличие от ручной оптимизации для переключателя излучения частотного диапазона 70 ГГц. Основной трудностью оптимизации резонансной структуры переключателя является её низкая обусловленность, т. е. отсутствие сходимости при использовании итеративных процедур синтеза, подобных [12, 13]. С другой стороны, современный уровень развития вычислительной техники и относительная простота электродинамической системы переключателя позволяют выполнять расчёты методом FDTD быстро. Фактически требуется только получение наилучшей амплитудно-частотной характеристики (т. е. с глубоким уединённым резонансом) в отсутствие лазера. Поэтому было решено выполнить оптимизацию геометрии переключателя автоматическим простым перебором («brute force») основных геометрических параметров.

Для этой задачи расчётная процедура метода FDTD была максимально упрощена: были исключены все нелинейные процессы — фотоэффект, релаксация фотопроводимости и диффузия носителей заряда в полупроводнике. Учитывались постоянная диэлектрическая проницаемость полупроводника, потери в нём, конечная проводимость медных стенок и идеально согласованные граничные условия без разделения компонент поля (Unsplit Perfectly Matched Layer, UPML) [7, 8]. Была использована двумерная декартова сетка координат.

Расчёт и анализ амплитудно-частотной характеристики проводился в частотном диапазоне  $230 \div 290$  ГГц. Для оценки её формы можно использовать простейший функционал  $S[A(f)]$ , являющийся численной оценкой заданной амплитудно-частотной характеристики  $A(f)$ :

$$S[A(f)] = A_0 \left( 1 + \sum_{i=1}^N \frac{A_i f_0^n}{|f_i - f_0|^n} \right)^{-1}. \quad (7)$$

Здесь предполагается, что кривая  $A(f)$  имеет  $N$  резонансов,  $A_i$  — абсолютное значение глубины  $i$ -го резонанса в логарифмическом масштабе (т. е. в дБ),  $f_i$  — частота  $i$ -го резонанса, резонанс с нулевым индексом является самым глубоким. Положительное число  $n$  подбирается экспериментально в ходе расчётов. Функционал обращается в нуль при наличии бесконечного количества резонансов в заданной полосе частот. Большее значение функционала соответствует лучшей амплитудно-частотной характеристике, т. е. лучшему набору геометрических параметров.

Опытным путём было установлено конечное время в расчёте 10 нс, соответствующее примерно 2500 периодам электромагнитного поля с центральной частотой 260 ГГц. За это время

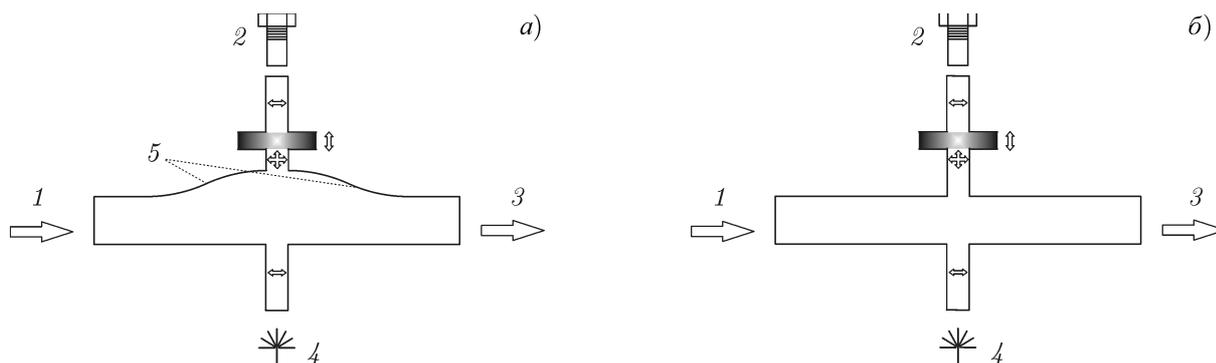


Рис. 6. Конструкции переключателя излучения с частотой 260 ГГц: до оптимизации (а), предварительно оптимизированная (б); 1 — входное СВЧ излучение, 2 — винт перестройки, 3 — выходное СВЧ излучение, 4 — лазер, 5 — две дуги окружностей

амплитудно-частотная характеристика  $A(f)$ , вычисляемая по формуле (5), становится стационарной, исчезают мелкие осцилляции — артефакты нестационарного метода. Оптимизированный расчёт методом FDTD с функционалом оценки амплитудно-частотной характеристики и выбором оптимального решения даёт около 1 решения в минуту на каждое процессорное ядро современного персонального компьютера (2012–2013 годов выпуска). Таким образом, за 1 месяц непрерывных расчётов с помощью процедуры можно получить и проанализировать примерно  $3 \times 10^5$  решений. В качестве шага изменения параметров была выбрана типичная инструментальная погрешность фрезерного станка 20 мкм, достигнутая нами на 2012 год.

#### 4. СИНТЕЗ РЕЗОНАТОРА МЕТОДОМ FDTD

Первоначальная конструкция переключателя, подлежащая оптимизации, приведена на рис. 6а. Подобно режекторному фильтру [3], она представляет собой резонатор на адиабатическом уширении прямоугольного волновода, заключённый между двумя отрезками регулярного волновода. Геометрия симметричного резонатора переключателя задаётся двумя дугами окружностей (3 независимых параметра) и ещё 5-ю величинами: параметрами закритических каналов и толщиной пластинки полупроводника, — т. е. всего 8-ю параметрами. За 1 месяц ( $3 \cdot 10^5$  расчётов) каждый параметр может принять в среднем 5 различных значений, что и было реализовано в предварительном расчёте. Оказалось, что центральная частота резонансной кривой почти полностью обусловлена толщиной полупроводниковой пластины. Влияние толщины пластины на частоту определяется следующим правилом: уменьшение толщины на 1 мкм вызывает увеличение частоты примерно на 1 ГГц. При этом остальные параметры резонанса изменяются незначительно. Таким образом, большинство резонансных кривых удаётся сдвинуть по частоте на требуемые 260 ГГц практически без изменений.

Предварительный расчёт показал, что оптимальная форма адиабатического уширения резонатора в переключателе нулевая, т. е. в оптимальном переключателе уширение отсутствует. Данное утверждение не является строго доказанным: оно есть результат перебора конечного числа значений параметров из некоторой разумной области значений. Таким образом, оптимизированная геометрия переключателя (рис. 6б) избавилась от существенного технического признака полового режекторного фильтра — наличия резонатора на уширении регулярного прямоугольного волновода. Для формирования резонатора в переключателе оказалось достаточным наличие самой пластины полупроводника, расположенной поперёк закритического канала на некотором расстоянии от исходного регулярного волновода.

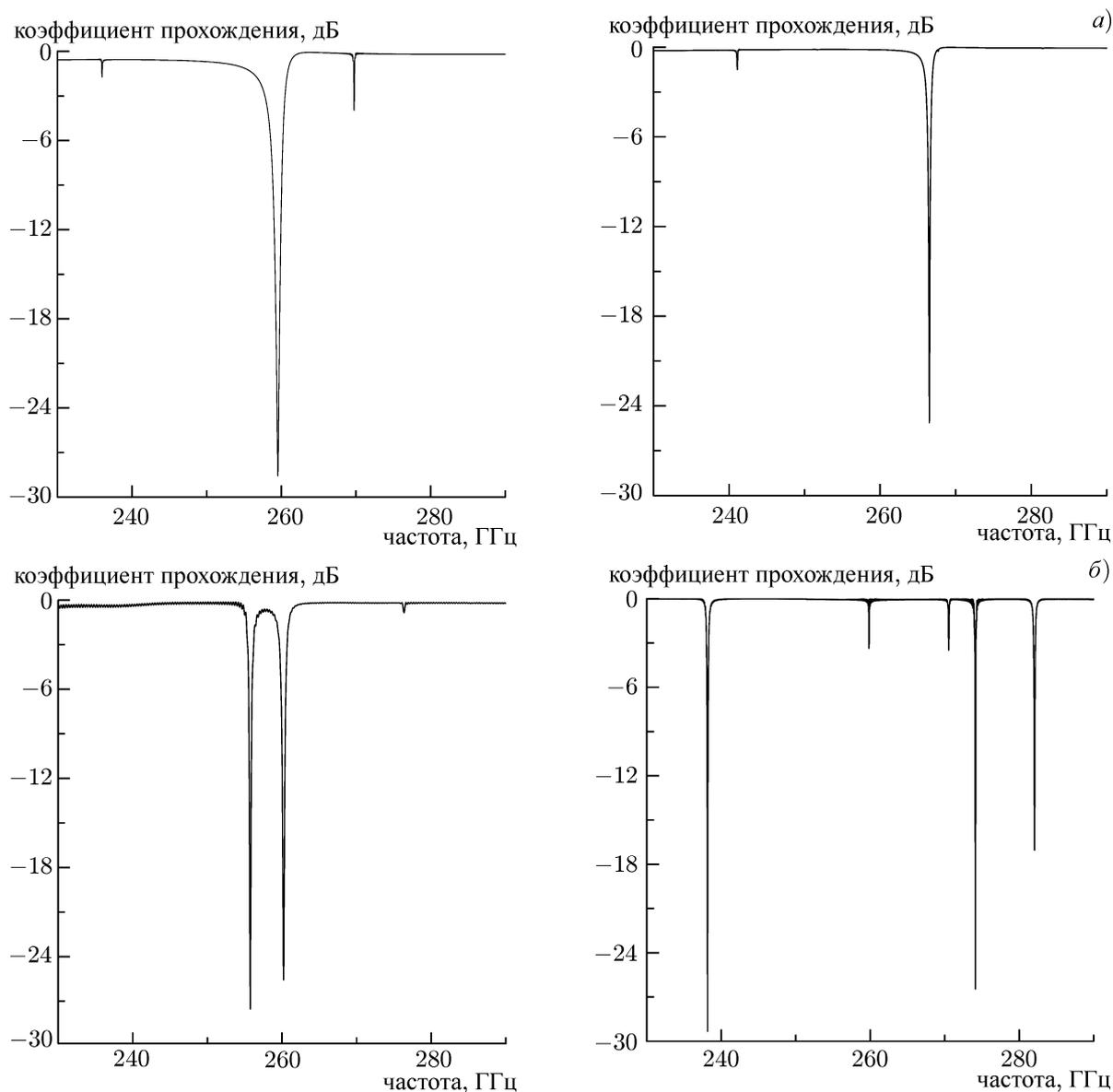


Рис. 7. Примеры «хороших» (а) и «плохих» (б) амплитудно-частотных характеристик в процессе синтеза резонатора

В конструкции переключателя осталось всего 5 параметров для оптимизации. Процедура окончательной оптимизации выглядит следующим образом. По входному набору параметров методом FDTD вычисляется амплитудно-частотная характеристика (5). В ней выбирается самый глубокий резонанс и делается попытка сдвинуть его на отметку 260 ГГц путём вариации толщины пластины. Полученная амплитудно-частотная характеристика оценивается с помощью функционала (7). Значение функционала и соответствующий ему набор параметров записываются и в дальнейшем сортируются. Наборы параметров, отвечающие «наилучшим» амплитудно-частотным характеристикам предлагаются в качестве оптимальных. Примеры «хороших» амплитудно-частотных характеристик со значениями функционала, близкими к 1, приведены на рис. 7а. Примеры «плохих» амплитудно-частотных характеристик со значениями функционала, близкими к 0, приведены на рис. 7б. В число «хороших» амплитудно-частотных характеристик попадают кривые, имеющие только один глубокий резонанс (глубина которого для медного волновода

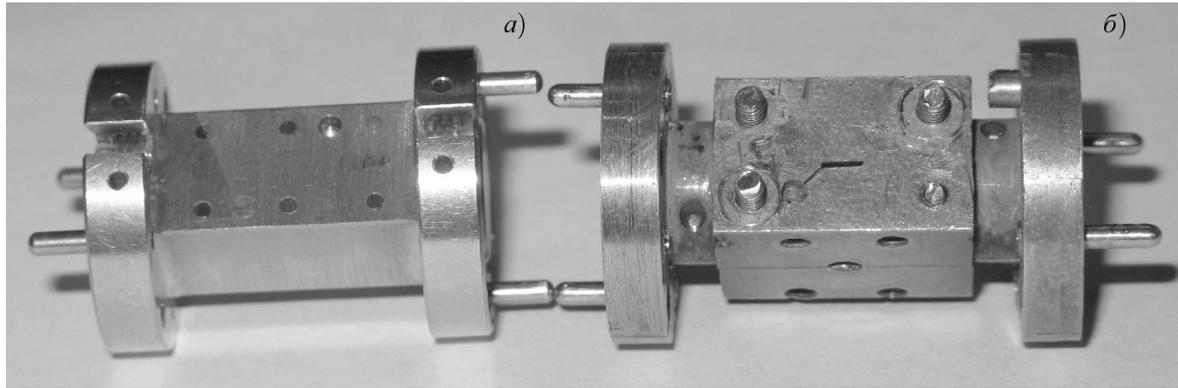


Рис. 8. Стандартный волновод IEA WR3 (а) и переключатель излучения с частотой 260 ГГц (б)

WR3 на 260 ГГц не выше  $-20$  дБ), других резонансов немного, они мелкие (не глубже нескольких дБ) и/или расположены далеко от основного. В число «плохих» амплитудно-частотных характеристик попадают кривые, имеющие либо несколько глубоких резонансов, либо большое количество резонансов.

По наилучшему набору параметров (рис. 7а, левый график), при наличии расчётного уединённого резонанса с глубиной  $-28$  дБ на частоте 259,8 ГГц, для конструкции с исходным волноводом WR3 были созданы чертежи, отработаны технологии производства и сборки и изготовлены действующие макеты переключателя. Также была предпринята попытка оптимизировать конструкцию с волноводом WR4, не увенчавшаяся успехом. Полученные в численном эксперименте амплитудно-частотные характеристики конструкции на волноводе WR4 были существенно хуже случая волновода WR3, что объясняется непригодностью волновода WR4 к использованию вблизи верхней частотной границы одномодовой добротной передачи волн, равной 260 ГГц.

## 5. ЭКСПЕРИМЕНТЫ С ПЕРЕКЛЮЧАТЕЛЕМ ИЗЛУЧЕНИЯ С ЧАСТОТОЙ 260 ГГц

Переключатель излучения с частотой 260 ГГц изготовлен по аналогии с волноводными компонентами стандарта IEA WR3 (производства США) с целью обеспечить совместимость с ними. На рис. 8 показан внешний вид такого переключателя в сравнении со стандартным волноводным переходом WR3. Основное внешнее отличие переключателя от волновода — наличие отверстий для полупроводниковой пластины и винта перестройки частоты в центре боковой поверхности. Переключатель выполнен из меди. Экспериментально полученные амплитудно-частотные характеристики переключателя в состояниях «выключен/закрит» (сплошная линия) и «включён/открыт» (пунктирная линия) приведены на рис. 9. Амплитудно-частотные характеристики в этих двух состояниях совпадают везде, кроме области основного резонанса с шириной в несколько гигагерц и центром при 266,68 ГГц. Основное несоответствие расчётам (рис. 7) состоит в невысоком коэффициенте прохождения вне резонанса, равном примерно  $-2$  дБ, и несовпадении центральной резонансной частоты. На рис. 9 экспериментальное значение глубины резонанса на центральной частоте 266,68 ГГц составляет примерно  $-14$  дБ, что вполне достаточно для проведения экспериментов с наносекундным лазером.

Для демонстрации эффекта переключения был проведён упрощённый эксперимент с дешёвым полупроводниковым лазером, являющимся источником непрерывного излучения с длиной волны 532 нм и мощностью примерно 200 мВт в непрерывном режиме. Габариты такого лазера

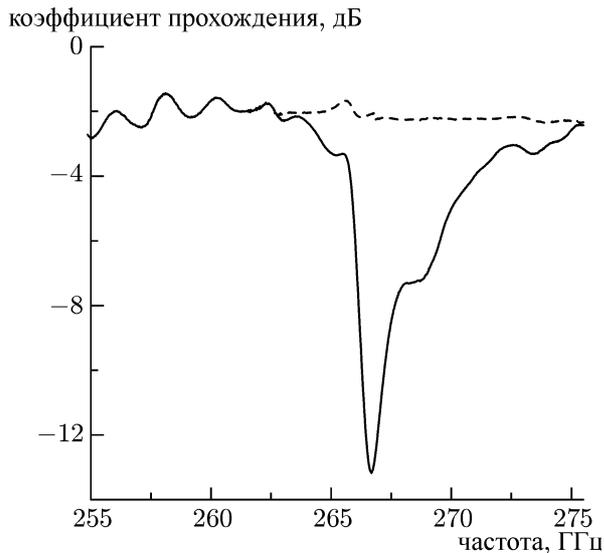


Рис. 9. Амплитудно-частотная характеристика переключателя излучения с частотой 260 ГГц, полученная экспериментально, в исходном состоянии (выключен/закрыт, сплошная кривая) и при подавлении резонанса винтом (включён/открыт, пунктир)

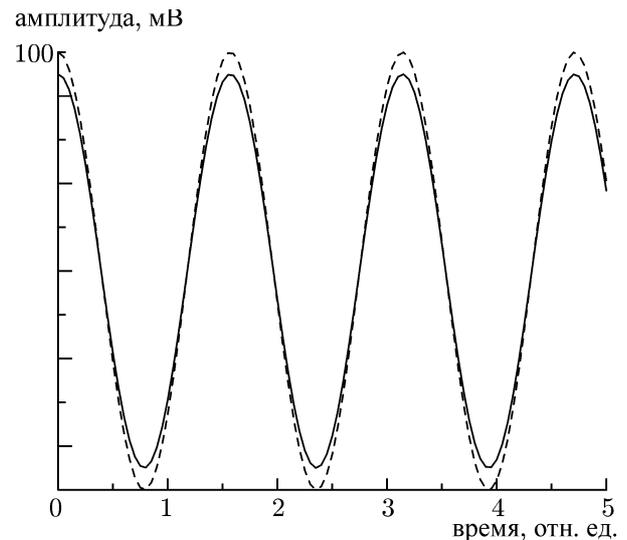


Рис. 10. Изменение сигнала детектора при выключении лазера: сплошная линия — сигнал детектора в отсутствие излучения лазера, пунктир — сигнал детектора при включении лазера

невелики, и его можно направить на пластинку вручную. Был использован источник СВЧ излучения от панорамного индикатора MVNA с мощностью около 500 мкВт в ручном режиме без качания частоты и с визуальной регистрацией сигнала детектора панорамы на осциллографе. Пучок лазерного излучения был направлен через нижнее по схеме рис. 6 отверстие закритического канала на полупроводниковую пластинку. Пучок прерывался вручную с целью создания лазерных импульсов. В ответ на экране осциллографа регистрировались относительно медленные (с масштабом порядка 100 мс) и относительно небольшие (около 10 %) изменения амплитуды усиленного модулированного с частотой 1 кГц сигнала детектора (см. рис. 10). Частота модуляции определяется модулятором панорамного индикатора MVNA. Сплошной линией показан сигнал детектора на центральной резонансной частоте 266,68 ГГц в отсутствие лазера. Амплитуда сигнала была порядка 100 мВ и определялась усилителем комплекса MVNA. Пунктиром показан сигнал детектора при попадании излучения лазера на пластинку. Несмотря на упрощённость эксперимента и невозможность регистрации быстрых процессов, продемонстрирован простейший эффект модуляции СВЧ излучения с частотой 266,68 ГГц методом расстройки резонатора лазера. Планируется проведение эксперимента с наносекундным промышленным лазером.

## 6. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В настоящей статье сообщается о разработке, изготовлении и исследовании наносекундных полупроводниковых переключателей СВЧ излучения диапазонов 70 и 260 ГГц, управляемых лазерными импульсами. Адекватность используемой численной модели на основе модифицированного метода FDTD подтверждена серией проведённых экспериментов. Метод FDTD позволяет выполнить синтез резонатора при современном уровне вычислительной техники, избегая характерных проблем сходимости процедуры непрерывной оптимизации [13] за счёт перехода к дискретному перебору значений параметров конструкции. Резонатор переключателя не нуждается в уширении волновода, которое необходимо для полосового режекторного фильтра [3].

Продемонстрированы широкие возможности по перестройке рабочей частоты СВЧ переключателя, которая оказывается не менее 10 % [5, 11]. Переключатель на частотный диапазон 70 ГГц изготовлен и успешно испытан с лазером, генерирующим импульсы с длительностью 100 фс и энергией 10 нДж при длине волны 870 мкм. Быстродействие переключателя составило порядка 1 нс [11]. Изготовлен действующий макет переключателя на частотный диапазон 260 ГГц, в котором продемонстрированы простейшие эффекты модуляции СВЧ излучения на частоте 266,68 ГГц при управлении дешёвым полупроводниковым лазером (длина волны 532 нм, мощность в непрерывном режиме 200 мВт).

Планируются эксперименты со стационарными промышленными наносекундными лазерами. Поскольку наличие фотоэффекта не зависит от частоты коммутируемого излучения, то используемый для переключателя излучения с частотой 70 ГГц лазер, очевидно, подойдёт и для переключателя излучения с частотой 260 ГГц. Однако ожидается, что успешное серийное внедрение переключателя будет иметь смысл при работе с намного более компактными инфракрасными лазерами с длиной волны 1,06 мкм (или их второй гармоникой с длиной волны 0,53 мкм), длительностью импульса от 10 до 100 нс и его энергией от 10 нДж до 1 мкДж.

В субтерагерцовом диапазоне переключатель может оказаться успешной альтернативой перспективным метаматериалам [14, 15].

Работа поддержана Российским научным фондом (проект 14–29–00192).

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Кац Л. И., Сафонов А. А. Взаимодействие электромагнитных колебаний сверхвысоких частот с плазмой носителей заряда в полупроводнике: в 2-х ч. Саратов: Изд-во Саратов. ун-та, 1979.
2. Madelung O. Semiconductors: Data handbook. Springer, 2003. 2 486 p.
3. Denisov G. G., Chirkov A. V., Belousov V. I., et al. // J. Infrared, Millimeter and Terahertz Waves. Springer, 2011. V. 32, No. 3. P. 343.
4. Кулыгин М. Л., Денисов Г. Г., Родин Ю. В. и др. Наносекундный полупроводниковый модулятор СВЧ излучения диапазона 66÷72 ГГц, управляемый лазерными импульсами: Препринт № 796 ИПФ РАН. Нижний Новгород, 2010.
5. Кулыгин М. Л., Денисов Г. Г., Родин Ю. В. // Письма в ЖТФ. 2011. Т. 37, № 8. С. 49.
6. Taflov A. Computational electrodynamics: the finite-difference time-domain method. Boston: Artech House, 1995.
7. Gedney S. D. // IEEE Trans. Antennas Propagat. 1996. V. 44, No. 12. P. 1 630.
8. Кулыгин М. Л. Численное моделирование трёхмерных многомодовых электродинамических систем электронных СВЧ приборов: Дис. . . к. ф.-м. н. Нижний Новгород, 2006.
9. Кулыгин М. Л., Денисов Г. Г., Кочаровский Вл. В. Моделирование динамических эффектов в полупроводниковом переключателе мощного СВЧ-излучения: Препринт № 747 ИПФ РАН. Нижний Новгород, 2007.
10. Kulygin M. L., Denisov G. G., Kocharovskiy Vl. V. // J. Infrared, Millimeter and Terahertz Waves. Springer, 2010. V. 31, No. 1. P. 31.
11. Kulygin M., Denisov G. // J. Infrared, Millimeter and Terahertz Waves. Springer, 2012. V. 33, No. 6. P. 638.
12. Денисов Г. Г., Калынова Г. И., Соболев Д. И. // Изв. вузов. Радиофизика. 2004. Т. 47, № 8. С. 688.
13. Кузиков С. В., Плоткин М. Е. // Изв. вузов. Радиофизика. 2009. Т. 52, № 3. С. 216.
14. Chen H.-T., O'Hara J. F., Azad A. K., et al. // Laser Photonics Rev. 2011. V. 5, No. 4. P. 513.

15. Schreckenhamer D. B., Burch K. L., Butch N. P., et al. // Optics Express. 2011. V. 19, No. 10. P. 9 969.

Поступила в редакцию 4 февраля 2014 г.; принята в печать 31 июля 2014 г.

### **DEVELOPMENT OF WAVEGUIDE SEMICONDUCTOR SWITCHES OF MICROWAVE RADIATION IN THE 70 AND 260 GHz RANGES**

*M. L. Kulygin, V. I. Belousov, G. G. Denisov, A. A. Vikharev, V. V. Korchagin,  
A. V. Kuzin, E. A. Novikov, and M. A. Khozin*

We have developed, manufactured, and studied experimentally prototypes of microwave switches operated in the 70 and 260 GHz frequency ranges and controlled by pulses of optical laser radiation. The results of modeling them numerically by the finite-difference time-domain (FDTD) method are presented, as well as design parameters of the prototypes. The switch speed is equal to 1 ns, and the microwave tuning frequency range amounts to approximately 10%. The process of switching with the use of inexpensive optical semiconductor laser (with a wavelength of 532 nm and a continuous-wave power of 200 MW) was demonstrated experimentally at a frequency of 266.68 GHz.