УДК 537.52

# ПЕРЕКЛЮЧЕНИЕ СУБТЕРАГЕРЦОВЫХ ВОЛН С ДИАПАЗОНОМ ПО ДЛИТЕЛЬНОСТИ В ДЕСЯТЬ ПОРЯДКОВ

М. Л. Кулыгин<sup>1</sup>\*, Г. Г. Денисов<sup>1,2</sup>, Е. А. Новиков<sup>1</sup>, А. П. Фокин<sup>1</sup>, И. А. Литовский<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Институт прикладной физики РАН;

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

Рассмотрены наносекундные субтерагерцовые волноводные переключатели, которые основаны на объёмном резонаторе с активным элементом из полупроводника, проводимость которого управляется лазером. Обсуждаются недавно обнаруженные возможности использовать эти переключатели для получения импульсов с очень большой длительностью, вплоть до десятков секунд, наряду с наносекундными импульсами на одном и том же прототипе устройства. Продемонстрированы экспериментальные факты коммутации без искажений когерентного излучения перспективных субтерагерцовых гиротронов, имеющих мощность порядка нескольких ватт и длительность импульсов до десяти секунд. Подтверждена и обобщена предложенная ранее теоретическая оценка предельных мощностей коммутируемого субтерагерцового излучения, для чего проведено измерение этих мощностей путём его сведе́ния к тривиальному измерению мощности излучения инфракрасного промышленного лазера. Обнаружено улучшение резонансных характеристик разработанного переключателя после коммутации нескольких последовательных длинных импульсов субтерагерцового излучения, полученное, вероятнее всего, за счёт «выжигания» микроскопических конструктивных дефектов, с приближением реальной амплитудно-частотной характеристики к расчётной. Теоретически предсказано и частично экспериментально подтверждено отсутствие возможности вывести из строя переключатель, находящийся в основном состоянии равновесия, при коммутации сколь угодно мощного субтерагерцового излучения вблизи полосы резонанса.

### ВВЕДЕНИЕ

Обратимое изменение проводимости полупроводника под действием оптического излучения хорошо известно в физике твёрдого тела [1] и имеет многочисленные применения в полупроводниковой технике [2], например для управления добротностью резонаторов в различных диапазонах длин волн [3]. Субтерагерцовые волноводные полупроводниковые переключатели [4, 5] с наносекундным быстродействием, разработанные в ИПФ РАН, представляют собой управляемые режекторные фильтры [6], состоящие из объёмного резонатора и активного полупроводникового элемента [7, 8]. Резонатор имеет вход и выход в виде одномодового волновода и управляется внешним лазерным излучением, освещающим полупроводниковый элемент и изменяющим его проводимость, а следовательно резонансную частоту и добротность резонатора, обратимым образом (см. рис. 1). Характерное время изменения характеристик резонатора зависит также от оптических и микроволновых свойств полупроводникового кристалла и его согласования с объёмным резонатором в основном состоянии равновесия. При использовании нелегированного арсенида галлия и лазеров видимого диапазона длин волн удаётся достичь быстродействия переключения вплоть до наносекунд в субтерагерцовом диапазоне частот коммутируемого сигнала [9]. Фотография действующего макета субтерагерцового переключателя представлена на рис. 2, наибольший размер переключателя (длина) составляет примерно 2,5 см.

В основном состоянии равновесия в отсутствие управляющего лазерного излучения переключатель обладает наименьшим коэффициентом передачи, отражая практически полностью входное субтерагерцовое излучение на резонансной частоте. При подаче управляющего лазерного импульса с подходящей для инициации фотоэффекта длиной волны и достаточной, в том числе

М. Л. Кулыгин, Г. Г. Денисов, Е. А. Новиков и др.

<sup>\*</sup> kmaxim@appl.sci-nnov.ru



Рис. 1. Структурная схема наносекундного субтера<br/>герцового волноводного переключателя: 1 — лазер, 2 — одномодовый волновод, 3 <br/>и4 — вход и выход СВЧ излучения соответственно, 5 — резонатор,<br/> 6 — винт перестройки



Рис. 2. Фотография прототипа субтерагерцового переключателя для частотного диапазона в районе 260 ГГц: 1 и 2 — вход и выход СВЧ излучения соответственно, 3 — лазер

для термоактивации проводимости [10] энергией, резонатор катастрофически теряет свою добротность, с нескольких сотен до единиц. Переключатель при этом открывается, т. е. начинает пропускать коммутируемое излучение с входа на выход. По окончании лазерного импульса переключатель спустя некоторое время релаксации, определяемое длительностью рекомбинации неравновесных носителей заряда в полупроводнике, закрывается, возвращаясь в основное состояние равновесия. Резонатор также приходит в исходное резонансное состояние.

Наименьшая длительность выходного субтерагерцового импульса, которую может обеспечить подобный переключатель, т. е. наилучшее быстродействие, составляет примерно одну наносекунду [6, 7, 8]. Длительность выходного им-

пульса может быть увеличена на много порядков, при этом в исходное коммутируемое излучение не вносится никаких заметных фазовых искажений. Частота повторения, скважность и количество импульсов практически не ограничены [11]. Все указанные достоинства позволяют использовать такие переключатели для модуляции когерентного субтерагерцового излучения гиротронов [12, 13], сохраняя фазы отдельных волновых пакетов когерентными между собой. Это позволяет, например, достичь новые недоступные ранее диапазоны точности в спектроскопии [14]. Наиболее часто используемым субтерагерцовым диапазоном для такой спектроскопии является

область частот вблизи 260 ГГц.

Подобные переключатели применительно к излучению гиротронов ранее не испытывались. Прежние тесты ограничивались невысокими (не более десятков милливатт) мощностями излучения перестраиваемых в широком диапазоне источников на основе ламп обратной волны и субтерагерцовых транзисторов [6–13]. В данной работе субтерагерцовый переключатель частотного диапазона в районе 260 ГГц с наносекундным быстродействием впервые испытан для квазинепрерывного излучения гиротрона с близкой частотой, мощностью до нескольких ватт и длительностью до импульсов 10 с. Успех проведённых экспериментов для указанных диапазонов длительностей и мощностей свидетельствует о возможности применения таких переключателей в установках для динамической поляризации ядер при ядерном магнитном резонансе в ближайшем будущем.

Статья включает три основных раздела: 1) краткое описание основ теории и моделирования переключателя, 2) модельный эксперимент по переключению излучения гиротрона, 3) разработка методики измерения мощности субтерагерцового излучения путём измерения мощности управляющего лазерного излучения инфракрасного диапазона.

#### 1. УРАВНЕНИЯ, ОПИСЫВАЮЩИЕ РАБОТУ ПЕРЕКЛЮЧАТЕЛЯ

Нами используется классическая теория переключателей и их численное моделирование, основанные на интегрировании системы уравнений Максвелла в дифференциальной форме с электрическим и магнитным токами:

$$\operatorname{rot}\mathbf{E} = -\frac{1}{c} \frac{\partial \mathbf{B}}{\partial t} - \frac{4\pi}{c} \left(\mathbf{j}_{\mathrm{m}} + \sigma_{\mathrm{m}}\mathbf{H}\right), \qquad \operatorname{rot}\mathbf{H} = \frac{1}{c} \frac{\partial \mathbf{D}}{\partial t} + \frac{4\pi}{c} \left(\mathbf{j} + \sigma\mathbf{E}\right), \operatorname{div}\mathbf{D} = 0, \qquad \operatorname{div}\mathbf{B} = 0, \quad (1)$$

где **E** и **H** — векторы напряжённости электрического и магнитного полей, **D** и **B** — векторы индукции электрического и магнитного полей, **j** и **j**<sub>m</sub> — векторы плотности сторонних электрического и эквивалентного магнитного токов,  $\sigma$  и  $\sigma_m$  — электрическая и эквивалентная магнитная проводимости среды соответственно, c — скорость света в вакууме, t — время. Переключатель содержит четыре вида материальных сред, параметры которых подробно рассмотрены в статье [8]:

1) вакуум, в котором система (1) имеет наиболее простой вид;

2) металл с конечной проводимостью на поверхности стенок волноводов и резонатора, на практике используются сплавы меди;

3) полупроводник, потери в котором связываются с электрическим током при  $\sigma = 0$ :

$$\mathbf{j} = eN(t, \mathbf{r})\mu\mathbf{E},\tag{2}$$

где N — полная концентрация свободных носителей заряда в полупроводнике,  $\mu$  — их эффективная подвижность, e — элементарный заряд, **r** — радиус-вектор;

4) идеально согласованный слой без разделения компонент (эквивалент граничных условий излучения перед входом и после выхода переключателя), который является абстракцией, удобной тем, что она полностью удовлетворяет уравнениям Максвелла, при этом величины  $\sigma$  и  $\sigma_{\rm m}$  принимают вид тензоров [15, 16].

Используются граничные условия идеального проводника, позволяющие прерывать и ограничивать сетку интегрирования:

$$[\mathbf{n}, \mathbf{E}] = 0, \qquad (\mathbf{n}, \mathbf{H}) = 0, \tag{3}$$

где **n** — вектор нормали к поверхности границы. Они не являются фиксированными и позволяют развить методику синтеза геометрической формы объёмного резонатора [5] для достижения глубокого уединённого резонанса в интересующей нас области частот.

Носителям заряда в полупроводнике, т. е. электронам и дыркам, приписываются одинаковые «средние» характеристики с целью упрощения численной модели. При этом динамика концентрации носителей N с учётом диффузии, релаксации и индуцирования фотопроводимости внешним лазерным излучением описывается уравнением

$$\frac{\partial N}{\partial t} = D\,\Delta N + g(z,t) - G_1(N - N_{\rm eq}) - G_2(N - N_{\rm eq})^2. \tag{4}$$

Здесь  $\Delta$  — оператор Лапласа, D — коэффициент амбиполярной диффузии в полупроводнике,  $G_1$  и  $G_2$  — коэффициенты релаксации первого и второго порядков соответственно, вычисляемые по результатам предварительных экспериментов [5, 10] по тестированию образцов полупроводника,  $N_{\rm eq}(T)$  — равновесное значение концентрации при установившейся температуре T полупроводника (в исходном состоянии — при комнатной температуре). Функция g(z,t) описывает индуцирование концентрации носителей лазерным излучением, определяется константой фотопроводимости I и зависит от координаты z, отсчитываемой от поверхности вглубь полупроводника:

$$g(z,t) = I \exp(-\alpha z) \left[\theta(t-t_0) - \theta(t-t_0-\tau)\right],\tag{5}$$



где  $\theta(t)$  — безразмерная временна́я функция Хевисайда управляющего лазерного импульса,  $t_0$  — время начала действия управляющего лазерного импульса,  $\tau$  — длительность импульса,  $\alpha$  — обратная глубина проникновения лазерного излучения в полупроводник. Константа фотопроводимости зависит от интенсивности  $W_{\rm pulse}/S\tau$  пучка лазерного излучения и оптических свойств полупроводника и вычисляется по формуле

$$I = \frac{\alpha W_{\text{pulse}} \eta}{S \tau \hbar \omega_L} \,. \tag{6}$$

Здесь величина  $\alpha^{-1}$  соответствует характерной ширине слоя фотопроводимости в полупроводнике при заданной длине волны лазерного излучения (используются лазеры видимого или инфракрасного диапазонов),  $W_{\rm pulse}$  — энергия лазерного импульса,  $\hbar\omega_{\rm L}$  — энергия кванта, типичная площадь пучка S составляет величину порядка 1 мм<sup>2</sup>,  $\eta$  — коэффициент полезного действия лазерного излучения, для арсенида галлия на границе видимого и инфракрасного диапазонов он

Рис. 3. Диаграмма распределения электрического поля в переключателе с оптимальным резонатором в состоянии резонанса (чёрный цвет соответствует узлам поля, максимальные интенсивности голубого и жёлтого цветов — пучностям со знаками минус и плюс соответственно)

составляет примерно 70% [17].

В уравнении динамики температуры, определяющей равновесную концентрацию носителей  $N_{\rm eq}(T)$  в (4), учитываются термодиффузия, джоулев нагрев коммутируемым электрическим полем субтерагерцового излучения и нагрев полупроводника лазерным излучением:

$$\frac{\partial T}{\partial t} = B \,\Delta T + J(\mathbf{r}, t) + L(\mathbf{r}, t),\tag{7}$$

где В — коэффициент термодиффузии в полупроводнике,

$$J(\mathbf{r},t) = \frac{e\mu N(\mathbf{r},t)E^2(\mathbf{r},t)}{C\rho}$$

М. Л. Кулыгин, Г. Г. Денисов, Е. А. Новиков и др.

— функция джоулева нагрева,  $L(\mathbf{r},t)$  — функция, характеризующая лазерный нагрев, C и  $\rho$  — теплоёмкость и плотность полупроводника соответственно.

Численное решение системы уравнений (1)–(7) проводится методом, реализованным в программном обеспечении собственной разработки авторов [13, 14]. Пример расчёта субтерагерцового переключателя частотного диапазона в районе 260 ГГц приведён на рис. 3 в виде распределения компоненты  $E_y$  электрического поля (ось y относится к декартовым координатам (x, y, z)). Переключатель имеет оптимальный по критерию наличия глубокого уединённого резонанса [8] резонатор. На рис. 3 переключатель изображён в резонансном квазистационарном состоянии, практически не отличающемся от исходного состояния равновесия в отсутствие управляющего лазерного импульса, и всё коммутируемое субтерагерцовое излучение отражается обратно на вход без существенных потерь.

## 2. ЭКСПЕРИМЕНТ С ГИРОТРОНОМ

Результаты численного моделирования согласуются с экспериментальными данными по измерению амплитудно-частотной характеристики (АЧХ) изготовленного прототипа переключателя. Измерения АЧХ проводились на панорамном индикаторе с генератором качающейся частоты производства компании ABmm (Франция) в диапазоне от 250 до 270 ГГц, имеющем перестраиваемый в широком диапазоне частот транзисторный источник субтерагерцового излучения с мощностью порядка 400 мкВт. Экспериментальная АЧХ перед испытаниями с гиротроном, приведённая на рис. 4, так же как и теоретическая, рассчитанная [8] численным методом конечных разностей во временной области [18, 19], имеет глубокий уединённый резонанс в области частот вблизи 260 ГГц.

Важным является закономерный вопрос о предельной мощности коммутируемого излучения для переключателя данной конструкции. Переключатель частотного диапазона в районе 260 ГГц имеет вход и выход в виде одномодово-



Рис. 4. Экспериментальная АЧХ переключателя частотного диапазона в районе 260 ГГц, измеренная до испытаний с использованием гиротрона ( $\delta$  — уровень вносимых потерь, f — частота). Резонансное значение —4,86 дБ достигается при f = = 260,24 ГГц

го (мода  $TE_{10}$ ) прямоугольного волновода международного стандарта IEA WR3 с поперечными размерами 0,864 × 0,432 мм. Известно [15], что максимальная мощность безопасно передаваемого непрерывного сверхвысокочастотного (СВЧ) излучения для такого волновода составляет величину порядка 20 Вт для обычных условий, а уже при 40 Вт пробой волновода развивается за времена менее миллисекунды. Выясним также, является ли максимально безопасная мощность для волновода безопасной для переключателя. Относительно слабым местом переключателя является полупроводниковая пластина толщиной примерно 200 мкм, являющаяся составной частью объёмного резонатора. Поперечные размеры активной зоны полупроводника, засвечиваемой лазером, и формирующей резонатора, составляют примерно 0,5 мм. В работе [11] приведена информация о том, что полупроводниковую пластину удалось вывести из строя инфракрасным лазерным импульсом с длиной волны 1,06 мкм, мощностью порядка 20 Вт и длительностью около 20 мс. Это

М. Л. Кулыгин, Г. Г. Денисов, Е. А. Новиков и др.





Рис. 5. Переключатель с установленным на вход прямоугольным рупором (a); переключатель без рупора в выходном тракте гиротрона в обёртке из материала, поглощающего СВЧ излучение  $(\delta)$ ; переключатель с рупором в выходном тракте гиротрона (a)

повреждение было легко заметить на АЧХ без разбора переключателя с извлечением пластины, т. к. глубокий уединённый резонанс без исправной пластины исчезает. При этом АЧХ примерно соответствует АЧХ прямоугольного волновода с небольшой степенью загрязнения. Таким образом, АЧХ является своеобразной мерой исправности переключателя. По её изменению можно судить о степени повреждения полупроводника.

Для эксперимента использовался гиротрон, который имеет частоту порядка 257 ГГц и работает в непрерывном режиме. Его выходное излучение имеет вид гауссова пучка с апертурой примерно 15 мм и мощностью около 30 Вт. Переключатель устанавливался в выходной тракт гиротрона, СВЧ вход переключателя юстировался примерно по центру пучка (см. рис. 5). Об лучение переключателя проводилось открытым способом, без каких-либо линий передачи. Выходной тракт гиротрона оборудован квазиоптическим преобразователем поля собственной моды резонатора гиротрона в гауссов пучок, поэтому влияние отражённого сигнала [20] от нагрузкипереключателя считалось незначительным. Тем не менее поглотители СВЧ излучения были установлены за переключателем и рядом с ним для предотвращения утечек в окружающую среду, а также для уменьшения отражённого сигнала [21]. Переключатель собирает из пучка незначи-





Рис. 6. Амплитудно-частотные характеристики переключателя до (чёрная линия) и после (красная линия) импульсов гиротрона с частотой 257 ГГц, мощностью 70 мВт и длительностью 1 с (*a*), 3 Вт и 1 с (*b*), 4 Вт и 10 с (*b*). Резонансные значения  $-5,08 \, \text{дБ}(a), -5,44 \, \text{дБ}(b)$  и  $-5,51 \, \text{дБ}(b)$ достигаются при f = 260,12; 260,18 и 260,22 ГГц соответственно

тельную часть мощности из-за большой разности площадей пучка и торца входного волновода переключателя. Поэтому для увеличения мощности на входе переключателя используется рупор с прямоугольным входом размером примерно 7 × 3 мм, позволяющий собрать в десятки раз бо́льшую мощность. Схема управления гиротроном также позволяла немного регулировать мощность выходного излучения в пучке без существенного изменения его структуры.

Была выполнена серия из трёх экспериментов с гиротроном. На вход переключателя подавались импульсы с мощностью 70 мВт (без рупора) и длительностью 1 с, 3 Вт (с рупором) с длительностью 1 с и 4 Вт с длительностью 10 с. После каждого из экспериментов переключатель извлекался из выходного тракта гиротрона и измерялась его АЧХ на панорамном индикаторе. Весь комплекс этого индикатора перед каждым измерением АЧХ проходил полную перекалибровку измерительной системы с целью исключения случайных ошибок. Амплитудно-частотные характеристики после каждого из длинных импульсов гиротрона показаны на рис. 6 красными линиями; для сравнения исходные АЧХ приведены чёрными линиями. Из рис. 6 видно, что после каждого из трёх экспериментов с мощным субтерагерцовым излучением АЧХ не только не деградировала в сторону «грязного волновода», но и несколько улучшилась. Глубина резонанса увеличивалась примерно на 0,5 дБ, а центральная частота полосы резонанса увеличивалась

М. Л. Кулыгин, Г. Г. Денисов, Е. А. Новиков и др.

примерно на 100 МГц (оба эти результата выше погрешности измерений). Соответственно, переключатель выдержал все три субтерагерцовых импульса, а его характеристики даже улучшились. Последнее, вероятнее всего, связано с выгоранием микроскопических загрязнений и шероховатостей, образовавшихся в процессе изготовления и эксплуатации переключателя, которые не могли быть удалены стандартными процедурами химической и ультразвуковой очистки.

Дальнейшее увеличение мощности и энергии в проведённой серии экспериментов было признано нецелесообразным, т. к. после импульса с мощностью 4 Вт и длительностью 10 с наблюдались признаки выгорания СВЧ поглотителя. Таким образом, наносекундный переключатель экспериментально продемонстрировал беспрецедентные способности работать с квазинепрерывным излучением гиротрона, выдержав без специальной защиты процессы включения и выключения гиротрона, а также серию мощных длинных импульсов с мощностью вплоть до 4 Вт и длительностью 10 с, покрывая диапазон коммутируемых импульсов в десять порядков по времени и демонстрируя при этом улучшение своих характеристик. Напомним, что переключение субтерагерцовых импульсов с мощностью более 20 мВт и длительностью свыше 1 с ранее не проводилось [6–13].

## 3. СВЕДЕ́НИЕ ЗАДАЧИ ИЗМЕРЕНИЯ МОЩНОСТИ СУБТЕРАГЕРЦОВОГО ИЗЛУЧЕНИЯ К ИЗМЕРЕНИЮ МОЩНОСТИ ИНФРАКРАСНОГО ЛАЗЕРА

Вопрос о верхней предельной мощности субтерагерцового излучения для переключателя остаётся открытым, хотя проведённые эксперименты позволили сузить область поиска ответа на этот вопрос. Существенными здесь являются и имеющиеся в настоящее время технические трудности при точном измерении мощностей субтерагерцового излучения в диапазоне примерно от 100 мВт до 10 Вт. Для измерения мощности менее 100 мВт успешно применяются полупроводниковые детекторы (в иностранной литературе их также называют пиродетекторами), находящиеся на линейном участке своих вольт-амперных характеристик. При мощности выше 10 Вт используются жидкостные калориметры на основе воды или водных растворов органических веществ, демонстрирующие адекватную точность измерений. Однако при измерениях мощности между этими двумя значениями полупроводниковыми детекторами становятся существенными нелинейные свойства р-п-перехода. Детекторы при этом входят в режим насыщения и могут сгореть при превышении максимально допустимого прямого напряжения (в диодах это значение обычно составляет около 0,5 В, что соответствует примерно 0,5 Вт детектируемой мощности СВЧ излучения в детекторах с типичной чувствительностью 1 В/Вт). Отдельно стоит вопрос о согласовании полупроводниковых детекторов с линией передачи приа значительных мощностях. Далее, калориметры имеют ограничение снизу на объём рабочего тела, связанное с капиллярными эффектами и температурными погрешностями современных термопар. На практике при значениях измеряемой мощности около 10 Вт это приводит к ошибкам порядка 100%. Конечно, задача может быть решена путём построения нестандартных калориметров или калиброванного деления или ответвления избыточной мощности, однако вопрос о целесообразности таких подходов является дискуссионным.

Вместе с тем задача точного измерения мощности промышленных инфракрасных лазеров с длиной волны 1,06 мкм давно решена. Устройства для прецизионного измерения мощностей лазерного излучения — болометры — широко известны, коммерчески доступны и недороги. Ранее в статье [11] было показано, что предельная мощность длинного инфракрасного лазерного импульса для переключателя лежит в промежутке между 1 и 20 Вт.

С целью сведения трудной задачи измерения мощности субтерагерцового излучения к элементарной задаче измерения лазерной мощности рассмотрим приведённое выше уравнение (7). В общем случае функции джоулева нагрева  $J(\mathbf{r},t)$  и лазерного нагрева  $L(\mathbf{r},t)$  различны. Например,

в условиях однофотонного фотоэффекта в арсениде галлия при длине волны лазерного излучения менее красной границы фотоэффекта 875 нм практически весь лазерный нагрев происходит в узком слое вблизи засвеченной поверхности полупроводника. Вместе с тем из численного решения (см. рис. 3) очевидно, что джоулев нагрев распределён по всей толщине полупроводниковой пластины.

Однако в случае инфракрасного лазера с длиной волны больше красной границы фотоэффекта однофотонный фотоэффект исчезает и лазерное излучение проникает в полупроводник намного глубже, что, впрочем, в целом не мешает переключателю сохранять работоспособность за счёт теплового рождения электронов и дырок [10]. В этом случае обе функции имеют максимумы посередине пластины и довольно плавно спадают к краям. Наше исходное приближение для пластины GaAs состоит в том, что в случае инфракрасного лазера с длиной волны 1,06 мкм обе функции приблизительно равны:

$$J(\mathbf{r},t) \approx L(\mathbf{r},t). \tag{8}$$

Пренебрегая потерями в металлических стенках волноводов и резонатора, будем считать, что весь джоулев СВЧ нагрев в переключателе происходит в области полупроводника. Это даст нам более пессимистичную оценку пересчёта мощностей, однако, как будет видно далее, только подкрепит полученный результат. С точностью до постоянной Больцмана и других постоянных параметров обе функции представляют собой произведения мощности коммутируемого субтерагерцового излучения и лазерной мощности на соответствующие коэффициенты отражения и прохождения:

$$J = \frac{e\mu NE^2}{C\rho} \propto (1 - \Gamma)P_{\rm E},\tag{9}$$

$$L \propto (1 - R)P_{\rm L},\tag{10}$$

где  $\Gamma$  — коэффициент прохождения субтера<br/>герцового излучения с мощностью  $P_{\rm E}$  через переключатель, R — коэффициент отражения лазер-



Рис. 7. Коэффициент прохождения субтерагерцового излучения через переключатель с подавленным резонансом. Горизонтальной чертой отмечено его среднее значение

ного излучения с мощностью  $P_{\rm L}$  от поверхности полупроводниковой пластины. Учитывая, что для мощных длинных лазерных импульсов расход энергии лазера на фотоэффект пренебрежимо мал, т. е. почти вся энергия идёт на нагрев, получаем

$$P_{\rm E} = \frac{(1-R)P_{\rm L}}{1-\Gamma} \,. \tag{11}$$

Величина R для арсенида галлия и промышленного инфракрасного лазера с длиной волны  $\lambda = 1,06$  мкм давно известна [17]:

$$R_{\rm GaAs}(\lambda = 1.06 \text{ MKm}) \simeq 0.3.$$
 (12)

Коэффициент Г для полосы частот вблизи резонанса (хотя и вне его) был получен экспериментально: его зависимость от частоты, т. е. АЧХ «грязного волновода», приведена на рис. 7. Для



Рис. 8. Осциллограммы двух серий мощных длинных лазерных импульсов (чёрные линии) и выходных сигналов переключателя (красные линии) как откликов на эти импульсы при мощности лазерного импульса 8 Вт и его длительности 320 мкс (*a*), 10 Вт и 400 мкс (*b*)

этой цели резонанс сдвигается (подавляется) винтом перестройки, указанным на рис. 1, переводом его в крайнее вкрученное положение. График на рис. 7 представляет собой нерегулярные осцилляции, включающие в себя, строго говоря, потери в полупроводниковой пластине и стенках волноводов с конечной проводимостью, а также погрешности измерений панорамы. Пренебрегая потерями в металле, погрешностью измерений и незначительными осцилляциями, возьмём среднее значение функции на этом графике в качестве Г:

$$\Gamma \approx -0.4 \text{ дБ.} \tag{13}$$

Предельная лазерная мощность  $P_{\rm L}$  также определена экспериментально, по стандартной схеме [11–13] с источником малой мощности СВЧ излучения. Полупроводниковая пластина облучалась сериями из сотен длинных лазерных импульсов с мощностью порядка нескольких ватт. Специальных мер теплоотвода для переключателя не предусматривалось. Мощность P<sub>L</sub> определялась как средняя мощность лазерного излучения, при котором выделяется из шумов и становится заметным эффект накопления тепла, выражающийся в квазипостоянном смещении показаний на выходе детектора мощности СВЧ излучения на выходе переключателя. На рис. 8 показан фрагмент соответствующего эксперимента (U — напряжение на детекторе). Серии лазерных импульсов показаны на графиках чёрными линиями, соответствующие отклики СВЧ детекторов на выходе переключателя — красными сплошными линиями в нижней части графиков; для удобства отклик СВЧ детектора имеет отрицательную полярность. При мощности лазерных импульсов 8 Вт. длительности 320 мкс и периоде повторения 1 мс (см. рис. 8a) накопления тепла практически не наблюдается: осциллограмма отклика СВЧ детектора возвращается в нуль каждый раз по завершении лазерного импульса. Однако при мощности 11 Вт и длительности 400 мкс после 200 лазерных импульсов осциллограмма отклика СВЧ детектора демонстрирует постоянное смещение, релаксирующее спустя сотни миллисекунд, что соответствует процессу теплопередачи, ранее подробно рассмотренному в статье [11]. Это и есть начало процесса разрушения переключателя, а следовательно

$$P_{\rm L} = P_{\rm L\,peak} \frac{t_{\rm pulse}}{t_{\rm repeat}} = 4,4 \text{ Br.}$$
(14)

М. Л. Кулыгин, Г. Г. Денисов, Е. А. Новиков и др.

Здесь  $P_{\text{L peak}}$  — пиковая мощность импульса лазера,  $t_{\text{pulse}}$  — длительность импульса и  $t_{\text{repeat}}$  — периодя повторения импульсов. Подставляя полученные значения (12), (13) и (14) в формулу (11), получаем оценку предельной мощности СВЧ излучения по известной предельной лазерной мощности:

$$P_{\rm E} \approx 35 \; {\rm Br.}$$
 (15)

Полученная оценка (15) превышает предельно допустимую непрерывную мощность CBЧ излучения [22] для прямоугольного волновода стандарта WR3 (с размером 0,864 × 0,432 мм), что позволяет нам констатировать невозможность разрушения переключателя, находящегося в основном состоянии равновесия, никакой мощностью CBЧ излучения с частотой вблизи полосы резонанса переключателя, поданной на его вход. Пробой волновода на входе переключателя будет происходить при мощности CBЧ сигнала, ещё не достигающей необходимой для перегрева и деградации полупроводника величины.

## 4. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Существует немного переключателей, способных покрыть одним и тем же устройством десять временны́х порядков по длительности модуляции, от наносекунды до десяти секунд. Увеличение длительности импульса для относительно быстрого переключателя неизбежно приводит к бо́льшим потерям энергии. Следовательно, для сохранения температурного режима работы потребуется теплоотвод или более массивный активный элемент.

Наносекундный волноводный полупроводниковый переключатель представляет собой компромиссный вариант резонатора и быстрого активного элемента — относительно компактной (с размерами меньше или порядка длины CBЧ волны) пластины из арсенида галлия с наносекундной релаксацией носителей заряда, встроенной в подходящий по добротности резонатор. При этом резонатор имеет массивные медные стенки и может выдерживать относительно больши́е тепловые перегрузки, т. е. высокие мощности и энергии коммутируемых импульсов. Быстро откликающийся полупроводник играет роль затвора, он управляет резонатором, рассеивая на себе незначительную часть запасённой энергии и мощности проходящего излучения. Сочетание субтерагерцового излучения с оптическим или инфракрасным лазером позволяет организовать ввод излучения последнего в самый центр резонатора для эффективного обратимого изменения его характеристик через закритический для субтерагерцового излучения волновод, который для излучения лазера является отличным каналом транспортировки с пренебрежимо малыми потерями.

Изначально переключатель разрабатывался как наносекундный, однако в данной работе теоретически выявлены и частично экспериментально подтверждены физические эффекты, позволяющие использовать его для длинноимпульсной модуляции когерентного излучения. Переключатель в реальном эксперименте выдержал процессы включения и выключения гиротрона, а также импульсы субтерагерцового излучения вплоть до мощности 4 Вт и с длительностью до 10 с. При этом переключатель не был повреждён, а наоборот, его АЧХ улучшилась вследствие выгорания примесей и дефектов изготовления поверхности волноводов и резонатора. Проведённая теоретико-экспериментальная оценка позволила заключить, что в основном состоянии равновесия вблизи полосы резонанса переключатель не может быть выведен из строя никакой мощностью непрерывного СВЧ излучения на входе, не вызывающей пробоя волноводного тракта. Полупроводниковая пластина переключателя защищена от избытка мощности коммутируемого субтерагерцового излучения конструкцией переключателя, а именно наличием входного одномодового волновода.

Авторы выражают благодарность М.Ю.Глявину за предоставленный гиротрон, а также за постоянное внимание к работе и стимулирующие дискуссии. Работа выполнена при поддержке РФФИ (проект 18–08–00672).

# СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- 1. Фотоэлектрические явления в полупроводниках и размерно-квантованных структурах / под ред. Л. Е. Воробьёва. СПб: Наука, 2001. 250 с.
- 2. Кац Л. И., Сафонов А. А. Взаимодействие электромагнитных колебаний сверхвысоких частот с плазмой носителей заряда в полупроводнике. Саратов: Изд-во Сарат. ун-та, 1979. В 2-х ч.
- Pang A. W., Bensmida S., Gamlath C. D., Cryan M. J. // IET Microwaves, Antennas & Propag. 2018. V. 12, No. 7. P. 1060.
- Денисов Г. Г., Кочаровский Вл. В., Кулыгин М. Л. // Изв. РАН. Сер. физическая. 2009. Т. 73, № 1. С. 98.
- Kulygin M. L., Denisov G. G., Kocharovsky Vl. V. // J. Infrared Millim. Terahertz Waves. 2010. V. 31, No. 1. P. 31.
- 6. Кулыгин М. Л., Денисов Г. Г., Родин Ю. В. // Письма в ЖТФ. 2011. Т. 37, № 8. С. 49.
- 7. Kulygin M., Denisov G. // J. Infrared Millim. Terahertz Waves. 2012. V. 33, No. 6. P. 638.
- Кулыгин М. Л., Белоусов В. И., Денисов Г. Г. и др. // Изв. вузов. Радиофизика. 2014. Т. 57, № 7. С. 568.
- Kulygin M., Denisov G., Vlasova K., et al. // J. Infrared Millim. Terahertz Waves. 2015. V. 36, No. 9. P. 845.
- 10. Kulygin M., Denisov G., Vlasova K., et al. // Rev. Sci. Instrum. 2016. V. 87. Art. no. 014704.
- 11. Kulygin M., Denisov G., Shubin S., et al. // IEEE Trans. Terahertz Sci. Technol. 2017. V.7, No. 2. P. 225.
- Kulygin M. L., Denisov G. G., Salahetdinov S. H., et al. // EPJ Web of Conf. 2017. V. 149, Art. no. 04030.
- 13. Kulygin M. L., Denisov G. G., Fokin A. P., et al. // EPJ Web Conf. 2018. V. 195, Art. no. 02005.
- 14. Wind R. A., Duijvestijn M. J., van der Lugt C., et al. // Progress Nuclear Magnetic Resonance Spectroscopy. 1985. V. 17. P. 33.
- 15. Gedney S. D. // IEEE Trans. Antennas Propag. 1996. V. 44, No. 12. P. 1630.
- 16. Кулыгин М. Л. Численное моделирование трехмерных многомодовых электродинамических систем электронных СВЧ приборов: Дис. . . . канд. физ.-мат. наук. Нижний Новгород: ИПФ РАН, 2006. 111 с.
- 17. Phillip H. R., Ehrenreich H. // Phys. Rev. 1963. No. 129. P. 1550.
- Kulygin M. L., Denisov G. G., Chirkov A. V., Kuzikov S. V. // J. Infrared Millim. Terahertz Waves. 2006. V 27, No. 4. P. 591.
- 19. Denisov G. G., Kulygin M. L. // J. Infrared Millim. Terahertz Waves. 2005. V. 26, No. 3. P. 341.
- 20. Глявин М. Ю., Запевалов В. Е., Кулыгин М. Л. // Изв. вузов. Радиофизика. 1999. Т. 42, № 11. С. 1092.
- 21. Glyavin M., Kulygin M., Moiseev M., et al. // International University Conference Proceedings. Electronics and Radiophysics of Ultra-High Frequencies. 1999. P. 113.
- 22. Thumm M. // Generation and Application of High Power Microwaves / ed. by R. A. Cairns, A. D. R. Phelps. Bristol and Philadelphia: Institute of Physics Publishing, 1997. P. 121.

Поступила в редакцию 24 апреля 2018 г.; принята в печать 28 сентября 2018 г.

М. Л. Кулыгин, Г. Г. Денисов, Е. А. Новиков и др.

## SWITCHING OF SUBTERAHERTZ WAVES WITHIN A DURATION RANGE OF TEN ORDERS OF MAGNITUDE

#### M. L. Kulygin, G. G. Denisov, E. A. Novikov, A. P. Fokin, and I. A. Litovsky

We consider nanosecond subterahertz waveguide switches based on a 3D resonator with an active element made of a semiconductor, whose conductivity is controlled by a laser. Recently discovered possibilities to use these switches to obtain pulses with very great durations (up to tens of seconds) along with nanosecond pulses in one and the same device prototype are discussed. Switching with no distortion of the coherent radiation of promising subterahertz gyrotrons, which have powers of about several watts and pulse durations of up to ten seconds are demonstrated experimentally. The theoretical estimate of limiting powers of the switched subterahertz waves, which was proposed earlier, is confirmed and generalized. For this purpose, we perform a measurement of the powers by reducing it to a trivial measurement of the power of radiation of an industrial IR laser. Improvement of the resonance characteristics of the developed switch after switching several sequential long subterahertz pulses has been revealed. Most probably, it is due to "burning-off" of microscopic manufacturing defects and the approach of the actual frequency-amplitude characteristic to the calculated one. It has been predicted theoretically and partially confirmed experimentally that it is not possible to disable the switch being in the ground equilibrium state as it switches arbitrarily high powers of subteraheratz waves near the resonance band.