

Об.3

УПРАВЛЯЕМЫЙ УДАРНОЙ ИОНИЗАЦИЕЙ
РЕЗОНАНСНЫЙ ПОЛУПРОВОДНИКОВЫЙ
ЭЛЕМЕНТ В ВОЛНОВОДЕВ.Н. Ч у п и с, В.Е. Ч е р к а с о в,
А.В. К а л а ш н и к о в, В.П. Ц а р е в

Полупроводниковый элемент, обладающий в режиме ударной ионизации существенно нелинейными характеристиками, вызывает естественный интерес с точки зрения возможных практических приложений в СВЧ технике коротковолнового диапазона. Широкий диапазон изменения концентрации свободных носителей и, соответственно, управляемое изменение на 3–4 порядка проводимости полупроводника, указывает на принципиальную возможность создания управляющего прибора на высокие уровни СВЧ мощности. Проведенные к настоящему времени теоретические и экспериментальные исследования эффекта ударной ионизации в тонких с толщиной меньшей характерной диффузионной длины полупроводниках (в *InSb*, например, $L_D \approx 150$ мкм), определили основные принципы управления внешними электрическим и магнитным полями объемным распределением неравновесных носителей и электродинамическими характеристиками тонких полупроводниковых элементов и пленок [1, 2]. Однако тривиальное решение, при котором перекрывающая волноводный тракт полупроводниковая пластина, подключенная к источнику ионизирующего напряжения, выполняет функции управляющего прибора, оказывается сложноосуществимым из-за сравнительно невысокого ослабления, вносимого ионизированным тонким полупроводниковым элементом. Для элементов из *InSb* толщиной $L_0 = 100$ мкм, этот уровень ослабления составляет $L \approx 15$ Дб.

По этой причине в рамках данной работы было проведено исследование возможности создания резонансной системы на основе так называемого реактивного штыря, представляющего собой расположенный перпендикулярно широкой стенке волновода полупроводниковый элемент, одним из электрических контактов к которому служит стенка волновода, а другой представляет собой припаянную к концу полупроводникового штыря тонкую металлическую проволоку, параллельную широкой стенке волноводного тракта. Простая физическая аналогия позволяет предположить, что эквивалентная схема ионизированного полупроводникового штыря с концентрацией свободных носителей $n \sim 10^{16}$ см⁻³ представляет собой последовательно включенные емкость и индуктивность. Подобный полупроводниковый элемент, погруженный в волновод и соединенный с его стенкой, создает значительное реактивное поле за счет токов проводимости, наведенных в нем падающей СВЧ волной. При определенной длине (h) полупроводника (в случае металлического штыря при $h = \frac{\lambda}{4}$) насту-

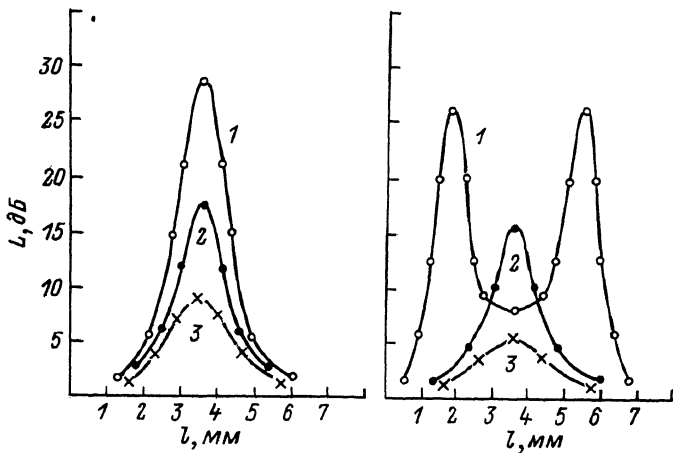


Рис. 1. Зависимость ослабления от расположения ионизированного полупроводникового штыря в волноводе при его перемещении от одной узкой стенки к другой: а - $h = 3.0$ мм, б - $h = 3.2$ мм. 1 - $f = 29$ ГГц, 2 - $f = 35$ ГГц, 3 - $f = 37$ ГГц.

пает резонанс и его реактивная проводимость становится бесконечной. Штыри с $h < \frac{\lambda}{4}$ имеют емкостную проводимость, т.к. в их реактивном поле преобладает электрическая энергия. Штыри с $h > \frac{\lambda}{4}$ возбуждают преимущественно магнитное поле и эквивалентны шунтирующей индуктивности.

В экспериментах использовались образцы $InSb$ с концентрацией электронов при температуре жидкого азота $n = 2.15 \cdot 10^{12}$ см $^{-3}$. Использование узкозонного полупроводника в данном случае не принципиально и связано с сравнительно невысоким значением пороговой напряженности ионизирующего поля ($E_{fl} = 200$ В/см) в этом материале. На полупроводниковый образец подавались ионизирующие импульсы длительностью от 0.01 до 0.5 мкс (время развития процесса ударной ионизации в антимониде индия составляет $\sim 10^{-9}$ с), при этом концентрация свободных носителей увеличивалась до $5 \cdot 10^{16}$ см $^{-3}$.

Графики зависимости ослабления, вносимого ионизированным полупроводниковым элементом, от его расположения в стандартном волноводном тракте 8-ми мм диапазона ($S = 7.2 \text{ } 3.4$ мм 2) представлены на рис. 1. Здесь нужно отметить характерную особенность - при длине полупроводника $h < 3.1$ мм ($S = 0.8 \text{ } 0.1$ мм 2) ослабление максимально при размещении полупроводника в центре волноводного тракта (рис. 1, а), что соответствует ослаблению основного типа колебаний H_{10} . При $h > 3.1$ мм характер зависимости ослабления от расположения полупроводникового штыря в волноводе

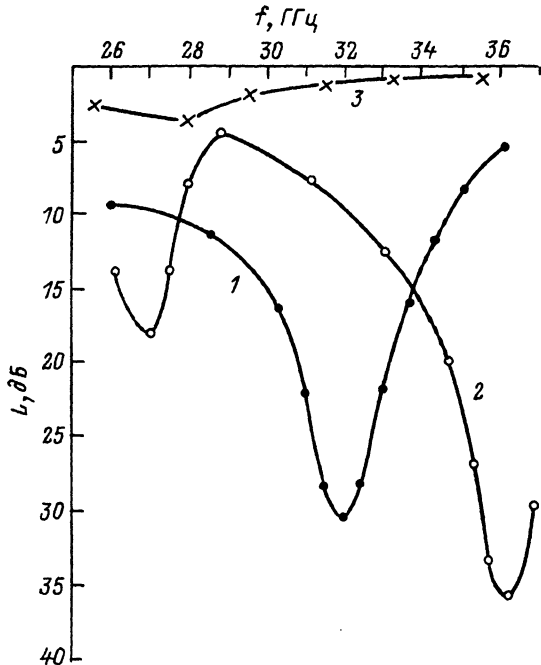


Рис. 2. Зависимость ослабления от частоты для двух полупроводниковых штырей, первый с $h=3.0$ мм расположен в центре волновода, второй с $h=3.2$ мм у узкой стенки ($l=1.3$ мм). 1 - ионизирующее напряжение подано на первый штырь; 2 - ионизированы оба штыря; 3 - ослабление, вносимое неионизированными штырями.

изменяется - наблюдается зависимость $L(L)$ (кривая 1 на рис. 1, б), которая может быть связана с ослаблением колебаний типа H_{20} . Аналогичный характер зависимости $L(L)$ был получен в [3] при измерении ослабления, вносимого полупроводниковым элементом из $InSb$ при $T=293$ К. Подобная зависимость, на наш взгляд, не имеет простого физического объяснения и, по-видимому, должна быть получена при расчете соответствующей электродинамической системы. График зависимости ослабления, вносимого ионизированным полупроводником, от частоты при расположении полупроводникового штыря длиной $h=3.0$ мм в центре волноводного тракта, представлен на рис. 2 (кривая 1). Максимальное ослабление СВЧ сигнала в данном случае достигается на частоте $f=32.8$ ГГц и составляет ~ 30 Дб, при этом прямые потери, вносимые неионизированным полупроводником, не превышают 2 Дб (кривая 2 на рис. 2).

Наибольший интерес с точки зрения возможных практических приложений представляет эффект перестройки резонансной частоты при ударной ионизации размещенных в плоскости поперечного сечения

волновода двух полупроводниковых элементов различной длины. В данном случае полупроводник с $h=3.0$ мм размещен в центре волновода, а второй полупроводниковый элемент с $h=3.2$ мм у стенки волновода в области, соответствующей максимуму ослабления $L(l)$ на рис. 1, б (кривая 1). Изменяя подаваемое на полупроводниковые элементы ионизирующее напряжение, можно в широких пределах управлять резонансной характеристикой системы тонких полупроводниковых штырей. Рассмотренные зависимости получены при модуляции непрерывного СВЧ сигнала и в режиме ограничения СВЧ импульса (последний отличается тем, что ионизирующее напряжение подается на полупроводник одновременно с СВЧ импульсом).

Проведенные исследования могут иметь ряд очевидных приложений, связанных с созданием управляемых ударной ионизацией аттенюаторов, переключателей (реактивный полупроводниковый штырь слабо поглощает СВЧ мощность) и модуляторов в коротковолновой части СВЧ диапазона. Второе возможное направление исследований связано с разработкой управляемых фильтров и перестраиваемых резонаторов. Верхний рабочий предел импульсной мощности системы резонансных полупроводниковых штырей (в отличие от СВЧ диодов) ограничивается только средней рассеиваемой мощностью и может составлять десятки киловатт в импульсе.

С п и с о к л и т е р а т у р ы

- [1] Ч у п и с В.Н., К а ц Л.И. // ФТП. 1985. Т. 17. № 7. С. 1288-1296.
- [2] К а ц Л.И., Ч у п и с В.Н. В кн.: Взаимодействие электромагнитных волн с полупроводниками и полупроводниково-диэлектрическими структурами. Саратов: СГУ. 1988. Т. 1. С. 54-65.
- [3] У с а н о в Д.А., Ф е к л и с т о в В.Б., В а г а - р и н А.Ю. // Радиотехника и электроника. 1979. Т. 24. № 8. С. 1681-1683.

Саратовский
государственный
университет
им. Н.Г. Чернышевского

Поступило в Редакцию
12 июля 1989 г.