

## УПРАВЛЕНИЕ АМПЛИТУДОЙ И ФАЗОЙ ЭЛЕКТРОМАГНИТНОЙ ВОЛНЫ В ВОЛНОВОДЕ ПРИ ПОМОЩИ ГЕРМАНИЕВОЙ ПЛАСТИНКИ \*

*Н. В. Александров, Л. Б. Горская, Е. М. Гершензон, В. С. Эткин*

Показана возможность управления амплитудой и фазой электромагнитной волны в волноводе с помощью германиевой пластинки, стоящей поперек волновода и помещенной в магнитное поле, при пропускании по ней управляющего тока.

В работе Гана и Хогарта [1] был описан аттенюатор сантиметровых волн, использующий зависимость поглощения электромагнитных волн свободными носителями в германии от концентрации носителей. В дальнейшем эта заметка неоднократно цитировалась в обзорах, (см., например, [2,3]), но новых данных по использованию подобных устройств в диапазоне СВЧ не приводилось. В то же время, этот вопрос представляет интерес потому, что концентрация свободных носителей влияет не только на проводимость, определяющую поглощение электромагнитных волн, но и на диэлектрическую проницаемость полупроводника.

Действительно, проводимость и диэлектрическая проницаемость полупроводника определяются соотношениями [4,5] \*\*

$$\sigma = \frac{e^2 N \tau}{m^* [1 + (\omega\tau)^2]} ; \quad \varepsilon = \varepsilon_1 - \frac{4\pi N e^2 \tau^2}{m^* [1 + (\omega\tau)^2]},$$

где  $e$ —заряд электрона,  $N$ —число носителей тока в единице объема,  $\tau$ —время свободного пробега носителей,  $m^*$ —эффективная масса носителя,  $\omega$ —частота электромагнитного поля,  $\varepsilon_1$ —диэлектрическая проницаемость кристаллической решетки, определяемая связанными зарядами.

Как показывают экспериментальные исследования [6, 7, 9], вклад свободных носителей в диэлектрическую проницаемость высокоомных полупроводников может быть весьма значителен, что позволяет использовать измерения диэлектрической проницаемости полупроводников на СВЧ для определения  $m^*$  и  $\tau$ .

В настоящей работе исследовалась возможность фазовой и амплитудной модуляции электромагнитной волны, падающей на германиевую пластинку, стоящую поперек волновода, за счет изменения концентрации свободных носителей.

Управление концентрацией носителей производилось путем использования эффекта Холла в германиевой пластинке, где травлением и механической шлифовкой создавалась на противоположных поверхностях различная скорость рекомбинации [1,8]. ЭДС Холла прижимает линии управляющего тока попеременно к различно обработанным поверхностям и, тем самым, изменяет общую проводимость пластинки за счет изменения среднего времени жизни носителей тока [10]. Рас-

\* Доклад на III Всесоюзной конференции МВО СССР по радиоэлектронике, Киев, 1959.

\*\* В гауссовой системе единиц.

положение пластинки 1 в волноводе 2, а также взаимная ориентация магнитного поля  $\vec{H}$  и тока  $\vec{j}$  изображены на рис. 1. В работе использовался высокоомный ( $\rho \sim 35 \div 40 \text{ ом} \cdot \text{см}$ ) германий  $n$ -типа, легированный сурьмой и имеющий концентрацию свободных носителей  $N \sim 10^{14} \text{ частиц} \cdot \text{см}^{-3}$  и  $\epsilon_1 \sim 16$ . Пластинки имели толщину  $l = 0,25 \div 1 \text{ мм}$ .

Нормированное входное сопротивление пластинки, толщина которой мала по сравнению с длиной электромагнитной волны в германии, в нагруженном на согласованную нагрузку волноводе имеет вид [11]:

$$Z_{\text{вх}} = 1 - \operatorname{tg} \delta \frac{2\pi l [\epsilon - (\lambda_0/\lambda_{\text{кр}})^2]}{\lambda [1 - (\lambda_0/\lambda_{\text{кр}})^2]} - j \frac{2\pi l [\epsilon - 1]}{\lambda [1 - (\lambda_0/\lambda_{\text{кр}})^2]}$$

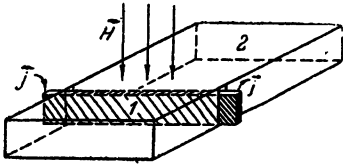


Рис. 1.

при  $\operatorname{tg} \delta \ll 1$ . Здесь  $\lambda_0$  — длина волны в свободном пространстве,  $\lambda_{\text{кр}}$  — критическая длина волны,  $\lambda$  — длина волны в волноводе,  $\operatorname{tg} \delta$  — тангенс угла потерь в германии.

Для модуля  $q$  и фазы  $\varphi$  коэффициента отражения можно получить следующие выражения:

$$q \approx \frac{1}{\sqrt{1 + [2/x' - \operatorname{tg} \delta]^2}};$$

$$\varphi \approx \operatorname{arc} \operatorname{tg} \frac{-2}{x' - 2 \operatorname{tg} \delta} \approx \operatorname{arc} \operatorname{tg} \frac{-\lambda [1 - (\lambda_0/\lambda_{\text{кр}})^2]^2}{\pi l (\epsilon - 1)},$$

где

$$x' = \frac{2\pi l [\epsilon - 1]}{\lambda [1 - (\lambda_0/\lambda_{\text{кр}})^2]}.$$

Отсюда видно, что модуль и фаза коэффициента отражения зависят от  $\epsilon$ . Соответствующая зависимость от  $\epsilon$  и  $\operatorname{tg} \delta$  имеет место и для прошедшей волны.

Экспериментальное исследование проводилось на установке, блок-схема которой изображена на рис. 2. На этой установке измерялись фаза и модуль коэффициента отражения, а также проводилось измерение фазы прошедшей волны в зависимости от величины тока, проходящего по пластинке, и напряженности магнитного поля.

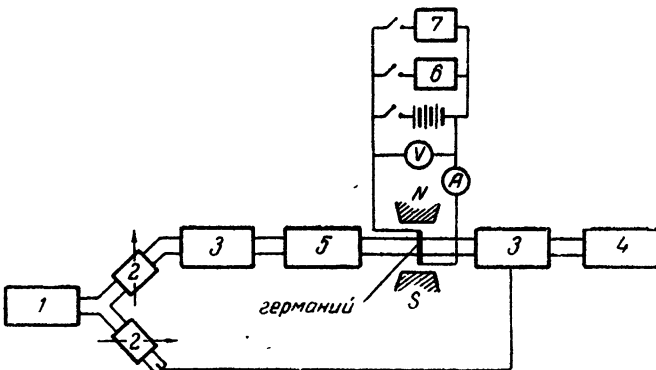


Рис. 2. Блок-схема установки:

- 1 — генератор, 2 — аттенюаторы, 3 — измерительная линия,
- 4 — эквивалент антенны, 5 — измерительная линия, 6 — звуковой генератор, 7 — генератор импульсов.

Результаты исследования сводятся к следующему.

Германиевая пластинка в магнитном поле действительно обладает различной проводимостью для токов разных направлений (перемена направления тока при неизменном магнитном поле изменяет проводимость в 2 раза). На рис. 3 представлены модуль (рис. 3а) и измененные фазы (рис. 3б) коэффициента отражения, а также изменение фазы прошедшей волны (рис. 3в). Из рис. 3б и 3в следует возможность фазовой модуляции, глубина которой может быть оценена по разности значений ординат для одной и той же величины тока (при разных направлениях тока).

Рис. 3. Зависимость модуля коэффициента отражения, изменения фазы отраженной ( $\Delta\varphi$ ) и прошедшей ( $\Delta\varphi$ ) волн от тока  $I$  через германиевую пластинку:

— в отсутствие магнитного поля, —х—, — — — в присутствии магнитного поля и разных направлениях тока ( $l = 0,95$  м)

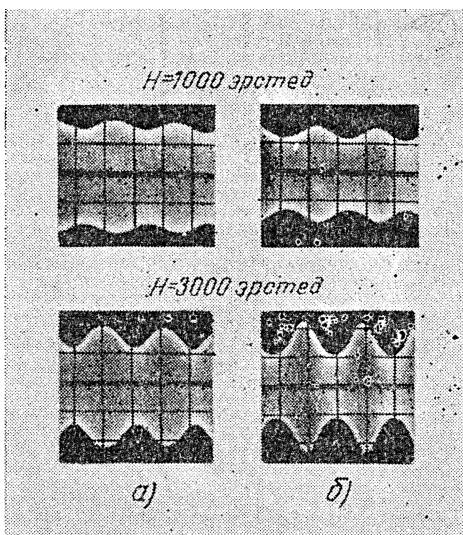
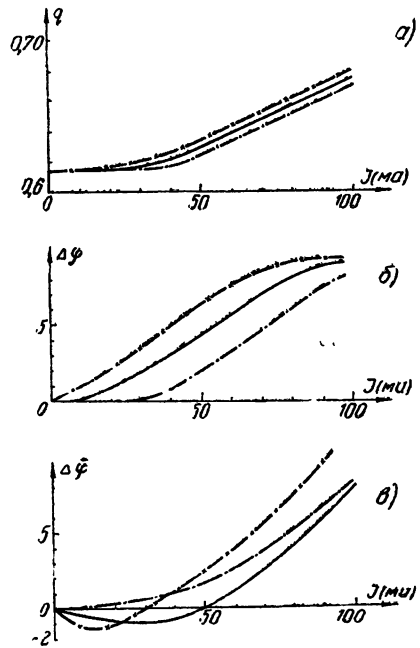


Рис. 4.

Если вместо эквивалента антенны за пластиной помещалась секция с поршнем на расстоянии в четверть длины волны от пластины, то можно было получить большую фазовую модуляцию при небольших значениях коэффициента отражения.

При подаче на пластинку переменного напряжения исследовалась модуляция отраженной от германиевой пластинки и прошедшей сквозь нее электромагнитной волны. Модуляция производилась от звукового генератора или генератора импульсов. Зависимости глубины модуляции от периода модулирующего напряжения не обнаружено вплоть до импульсов длительностью

0,1 мксек. На рис. 4 представлены осциллограммы, соответствующие

модуляции с частотой 500 *гц* как в отраженной (рис. 4а), так и в прошедшей (рис. 4б) волне при значениях напряженности магнитного поля 1000 и 3000 *эрстед* и согласованной нагрузке.

Следует отметить, что увеличение разности между скоростями рекомбинации на обеих поверхностях за счет более совершенной обработки пластинки должно существенно увеличить эффективность описываемого модулятора.

Авторы выражают признательность А. Э. Наджипу за помощь и консультации.

#### Л И Т Е Р А Т У Р А

1. J. V. Gunn, C. A. Hogarth, J. Appl. Phys., **26**, 353 (1955).
2. H. Buggley, Reports on Progress in Modern Phys., **20**, 344 (1957).
3. A. F. Gibson, J. Sci. Instrum., **8**, 3 (1958).
4. Проблемы физики полупроводников, сб. статей, ИЛ, М., 1958.
5. Р. Пайерлс, Квантовая теория твердых тел, ИЛ, М., 1958.
6. F. A. D'Alroy, H. J. Fan, Proc. of NEC, **8**, 522 (1952).
7. T. Weisshaar, H. Welker, Z. Naturforsch., № 8a, 681 (1953).
8. K. Benedikt, W. Schokley, Phys. Rev., **89**, 1152 (1953).
9. K. Benedikt, Phys. Rev., **91**, 1561 (1953).
10. В. Шокли, Теория электронных полупроводников, ИЛ, М., 1953.
11. Справочник по волноводам, изд. Сов. радио, М., 1952.

Московский педагогический институт  
им. В. И. Ленина

Поступила в редакцию  
8 июня 1959 г.