

## ТЕМПЕРАТУРНАЯ ЗАВИСИМОСТЬ ПОГЛОЩЕНИЯ ИЗЛУЧЕНИЯ МИЛЛИМЕТРОВОГО ДИАПАЗОНА *n*-ГЕРМАНИЕМ

Шеховцов Н. А.

Экспериментально исследована зависимость поглощения излучения диапазона частот 54—78 ГГц *n*-германием от тока инжекции  $p^+ - n$ ,  $n^+ - n$ -переходов и температуры. Показано, что эти зависимости у германия с собственной проводимостью аномальные, а у германия с проводимостью, близкой к собственной, изменяются с нормальной на аномальную. Полагается, что аномальный характер этих зависимостей обусловлен изменением поглощения излучения поверхностным потенциальным барьером германия при увеличении концентрации пар электрон—дырка в объеме.

В [1, 2] у германиевых модуляторов мощности излучения на зависимости поглощения излучения от тока инжекции наблюдался максимум. В связи с этим исследовано поглощение излучения диапазона частот 54—78 ГГц *n*-германием с различной величиной проводимости, близкой к собственной. Различные значения равновесной проводимости *n*-германия обеспечивались разной концентрацией донорной примеси в исходном германии, а изменение его проводимости осуществлялось как инжекцией  $p^+ - n$ ,  $n^+ - n$ -переходов, так и увеличением температуры.

Исследования показали, что характер зависимости поглощения излучения германием от концентрации пар электрон—дырка определяется величиной его равновесной проводимости и диапазоном частот излучения. Обнаружено три вида этой зависимости. У одной зависимости с ростом концентрации пар электрон—дырка поглощение излучения германием уменьшается, асимптотически приближаясь к величине, определяемой размерами кристалла. У другой зависимости с ростом концентрации пар электрон—дырка поглощение излучения германием вначале уменьшается, а затем увеличивается, проходя через минимум, величина которого определяется также размерами кристалла. У третьей зависимости с ростом концентрации пар электрон—дырка поглощение излучения увеличивается, асимптотически приближаясь к величине, определяемой размерами кристалла.

Первый вид зависимости поглощения излучения от концентрации пар электрон—дырка наблюдается у германия с почти собственной проводимостью. При увеличении концентрации доноров в германии проявляется вначале второй, а затем третий вид зависимости поглощения излучения от концентрации пар электрон—дырка. У *n*-германия с проводимостью, близкой к собственной, при увеличении частоты от 54 до 78 ГГц зависимость поглощения излучения от концентрации пар электрон—дырка изменяет свой вид с первого на второй.

Эти закономерности поглощения электромагнитного излучения *n*-германием были получены при исследовании поглощения излучения германием с удельным сопротивлением 52, 35 и 10 Ом·см. Из монокристалла вырезались пластинки, которые после травления в СР-4 имели размеры 5.2×2.6×0.5 мм. Переходы  $p^+ - n$  и  $n^+ - n$  в виде полосок с размерами 0.3×5.2 мм, расположенных на одной поверхности пластинки на расстоянии друг от друга около 1 мм, получались сплавлением сплавов In (92.7 %) + Ga (0.3 %) + Au (7 %) и Sn (97 %) + Sb (3 %) в атмосфере водорода. Одновременно с сплавлением сплавы приплавлялись

к никелевым проволокам диаметром 0.15 мм, которые служили выводами от  $p^+$ - и  $n^+$ -областей. После травления в 3%-ном растворе  $H_2O_2$ , промывки и сушки  $p^+ - n - n^+$ -диоды и никелевые проволоки покрывались тонким слоем защитного лака.

Такие  $p^+ - n - n^+$ -диоды помещались в отрезок волновода с размерами поперечного сечения  $3.6 \times 1.8$  мм плоскостью  $n$ -области  $5.2 \times 2.6$  мм на одну из широких стенок волновода с равным удалением от узких стенок. На фланце волновода перпендикулярно широким стенкам прорезались две канавки шириной и глубиной около 0.4 мм так, что у каждой из них одна стенка являлась продолжением плоскости одной из узких стенок волновода. В эти канавки укладывались изолированные выводы от  $p^+$ - и  $n^+$ -областей. Расположение канавок в минимумах электрического поля волны практически предотвращает выход излучения из волновода в свободное пространство. Помещенный таким образом

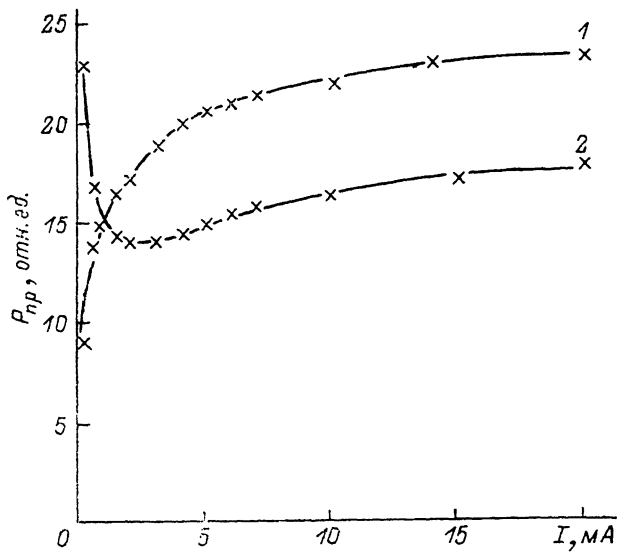


Рис. 1. Зависимости  $P_{отр} = F(I)$  при  $P_0 = 86$  отн. ед. германиевого  $p^+ - n - n^+$ -модулятора на частотах излучения, ГГц: 1 — 69, 2 — 76.  $n$ -область с  $52 \text{ Ом} \cdot \text{см}$  и размерами  $5.2 \times 2.6 \times 0.5$  мм.

$p^+ - n - n^+$ -диод в отрезок волновода представлял собой модулятор мощности электромагнитного излучения. Концентрацию пар электрон—дырка в  $n$ -области модулятора можно было изменять током инжекции  $I$  или температурой отрезка волновода  $T$ . Источником излучения был генератор Г4-142. Контроль мощности излучения, падающей на модулятор  $P_0$  и отраженной от модулятора  $P_{отр}$ , осуществлялся с помощью направленных ответвителей, нагруженных на детекторы Д407. Мощность излучения, прошедшего через отрезок волновода с модулятором  $P_{пр}$ , контролировалась детектором Д407, который служил нагрузкой волноводного тракта. Между этим детектором и ответвителем отраженного излучения находился согласователь. Все три детектора имели близкие вольт-ваттные характеристики. Мощность излучения генератора  $P_0$  выбиралась такой, которая обеспечивала близкую к линейной зависимость напряжения на детекторах от мощности излучения. При этом напряжения на детекторах были пропорциональны мощностям излучений  $P_0$ ,  $P_{отр}$  и  $P_{пр}$ .

На рис. 1 показаны зависимости  $P_{отр} = F(I)$  при  $P_0 = \text{const}$  германиевого  $p^+ - n - n^+$ -модулятора с удельным сопротивлением  $n$ -области  $52 \text{ Ом} \cdot \text{см}$  для частот излучения 69 и 76 ГГц. На 69 ГГц отражение излучения не удавалось наблюдать. На 76 ГГц отражение излучения значительно увеличивалось. Однако величина отраженной мощности излучения при увеличении тока инжекции  $I$  от 0 до 20 мА практически не изменялась. Отсюда следует, что характер

зависимостей  $P_{np} = F(I)$  обусловлен процессом поглощения электромагнитного излучения  $n$ -областью.

С увеличением тока инжекции концентрация пар электрон—дырка в  $n$ -области увеличивается. Следовательно, на 69 ГГц с ростом концентрации пар электрон—дырка поглощение излучения  $n$ -областью уменьшается, т. е. зависимость поглощения от концентрации пар электрон—дырка аномальная. Аномальный характер этой зависимости наблюдается в диапазоне частот 54—70 ГГц. На 76 ГГц с ростом концентрации пар электрон—дырка поглощение излучения  $n$ -областью, сначала увеличиваясь, достигает максимума, а затем уменьшается, т. е. зависимость поглощения от концентрации пар электрон—дырка изменяется с нормальной на аномальную. Изменение этой зависимости с нормальной на аномальную наблюдается в диапазоне частот 71—78 ГГц. При этом с увеличением частоты излучения поглощение при  $I=0$  уменьшается.

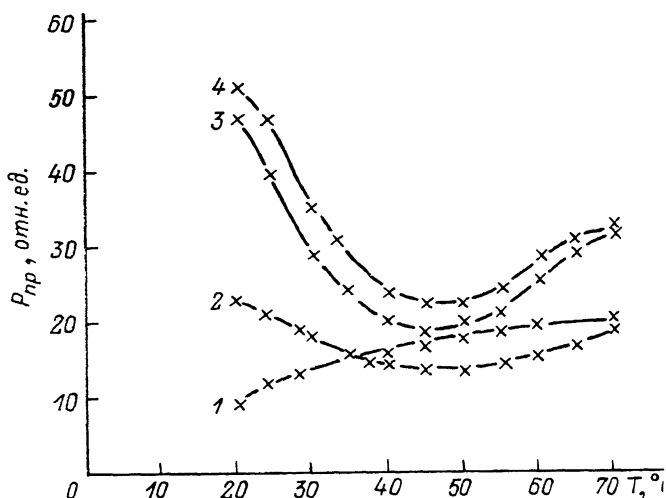


Рис. 2. Зависимости  $P_{np} = F(T)$  при  $P_0 = 86$  отн. ед.

1, 2 — германиевой области с  $52 \text{ Ом}\cdot\text{см}$   $p^+ - n - n^+$ -модулятора и 3, 4 — германиевой пластины с  $35 \text{ Ом}\cdot\text{см}$  с размерами  $5.2 \times 2.6 \times 0.5 \text{ мм}$  на частотах излучения, ГГц: 1, 3 — 69, 2, 4 — 76.

У германиевых  $p^+ - n - n^+$ -модуляторов с удельным сопротивлением  $n$ -области  $35 \text{ Ом}\cdot\text{см}$  зависимость  $P_{np} = F(I)$  в диапазоне частот 54—78 ГГц изменяется с нормальной на аномальную. У германиевых  $p^+ - n - n^+$ -модуляторов с удельным сопротивлением  $n$ -области  $10 \text{ Ом}\cdot\text{см}$  с ростом тока  $I$  от 0 до 20 мА мощность  $P_{np}$  уменьшается, асимптотически приближаясь к определенному значению.

Чтобы исключить влияние электрического поля  $p^+ - n - n^+$ -модулятора на поглощение излучения  $n$ -областью, исследовалась зависимость поглощения излучения  $n$ -областью от температуры. На рис. 2 показаны зависимости  $P_{np} = F(T)$  при  $P_0 = \text{const}$  для частот излучения 69 и 76 ГГц. Мощность отраженного излучения  $P_{отр}$  практически не изменялась в указанном интервале температур  $T$ . Поэтому характер зависимостей  $P_{np} = F(T)$  при  $P_0 = \text{const}$  и  $f = \text{const}$  обусловлен процессом поглощения излучения  $n$ -германием. При увеличении температуры  $p^+ - n - n^+$ -структуры (также, как и при увеличении тока инжекции) рост концентрации пар электрон—дырка приводит к уменьшению поглощения излучения частотой 69 ГГц и вначале к увеличению, а затем к уменьшению поглощения излучения частотой 76 ГГц. Зависимость  $P_{np} = F(T)$  аномальная в диапазоне частот 54—70 ГГц и изменяется с нормальной на аномальную в диапазоне частот 71—78 ГГц. Таким образом, аномальная зависимость поглощения излучения  $n$ -германием от концентрации пар электрон—дырка проявляется независимо от постоянного электрического поля.

У пластинки  $n$ -германия с удельным сопротивлением  $35 \text{ Ом}\cdot\text{см}$  и такими же размерами, как у  $p^+ - n - n^+$ -модулятора, зависимость  $P_{np} = F(T)$  в диапазоне

частот 54—78 ГГц характеризуется наличием минимума. На рис. 2 показаны зависимости  $P_{\text{пр}}=F(T)$  для излучения с частотой 69 и 76 ГГц. Зависимости  $P_{\text{отр}}=F(T)$  на этих частотах практически такие же, как у  $p^+-n-n^+$ -модулятора. Таким образом, у  $n$ -германия с 35 Ом·см зависимость  $P_{\text{пр}}=F(T)$  изменяется с нормальной на аномальную.

Характер зависимостей  $P_{\text{пр}}=F(I)$  и  $P_{\text{пр}}=F(T)$  при  $P_0=\text{const}$  не изменялся с изменением  $P_0$  в широких пределах.

В этих экспериментах зависимости  $P_{\text{пр}}=F(I)$  и  $P_{\text{пр}}=F(T)$  измерялись в условиях частичного заполнения поперечного сечения волновода  $n$ -германием.

Измерения поглощения излучения диапазона частот 54—78 ГГц  $n$ -германием при почти полном заполнении им поперечного сечения волновода позволили установить различные условия проявления нормальной и аномальной темпера-

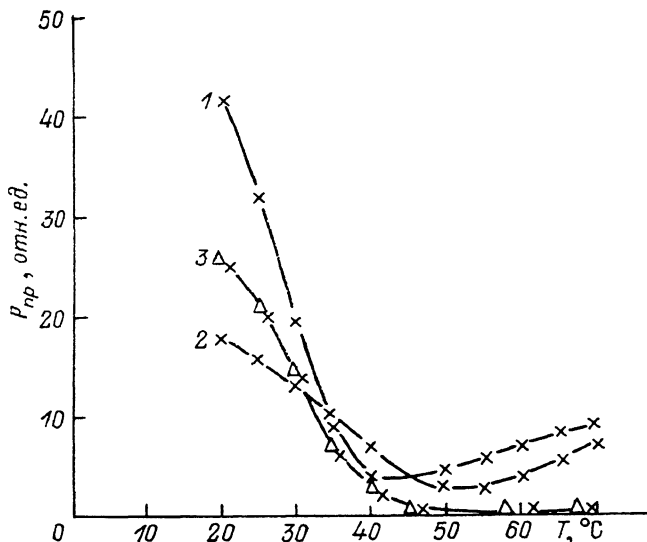


Рис. 3. Зависимость  $P_{\text{пр}}=F(T)$  при  $P_0=86$  отн. ед. кристалла германия с 35 Ом·см и размерами  $1.4 \times 1.75 \times 3.5$  мм при нахождении в плоскости поперечного сечения волновода.

1, 2 — плоскости кристалла  $1.4 \times 3.5$  мм, 3 — плоскости кристалла  $1.75 \times 3.5$  мм и образовании прижимных контактов плоскостями  $1.4 \times 3.5$  мм с широкими стенками волновода на частотах излучения, ГГц: 1, 3 — 69 и 2, 3 — 76.

турных зависимостей поглощения излучения. Для этого использовался кристалл германия с удельным сопротивлением 35 Ом·см, который после травления в СР-4 имел размеры  $1.4 \times 1.75 \times 3.5$  мм. Зависимости  $P_{\text{пр}}=F(T)$  и  $P_{\text{отр}}=F(T)$  кристалла германия при  $P_0=\text{const}$  измерялись при наличии электрических контактов кристалла с одной и с обеими широкими стенками волновода. В первом случае плоскость кристалла  $1.4 \times 3.5$  мм располагалась в плоскости поперечного сечения волновода, и прижимной контакт получался за счет давления кристалла на стенку волновода. Во втором случае в плоскости поперечного сечения волновода находилась плоскость кристалла  $1.75 \times 3.5$  мм, а прижимные контакты получались за счет прокладки между кристаллом и широкой стенкой волновода медной фольги толщиной 50 мкм. В обоих случаях кристалл не касался узких стенок волновода. Такое различие условий поглощения излучения кристаллом германия обеспечивало разный характер зависимостей  $P_{\text{пр}}=F(T)$ . В первом случае зависимость  $P_{\text{пр}}=F(T)$  изменялась с нормальной на аномальную во всем диапазоне частот. На рис. 3 показаны зависимости  $P_{\text{пр}}=F(T)$  для частот излучения 69 и 76 ГГц. Отражение излучения от кристалла на 69 ГГц было незначительным, а на 76 ГГц значительно увеличивалось, но практически не изменялось с ростом температуры. Таким образом, с ростом концентрации пар электрон—дырка поглощение излучения кристаллом германия вначале увеличивается, достигая максимума, а затем уменьшается. Во втором случае

зависимость  $P_{np} = F(T)$  характеризуется непрерывным уменьшением  $P_{np}$  с ростом  $T$  (рис. 3). При  $P_0 = \text{const}$  и  $T = \text{const}$   $P_{np}$  очень слабо зависит от частоты излучения при изменении ее от 54 до 78 ГГц. Зависимость  $P_{отр} = F(T)$  на частотах 69 и 76 ГГц была такой же, как и в первом случае. Таким образом, с ростом концентрации пар электрон—дырка поглощение излучения кристаллом германия непрерывно увеличивается.

Различный характер зависимостей  $P_{np} = F(T)$  при наличии контактов кристалла с одной и с обеими широкими стенками волновода обусловлен различным состоянием токовой цепи кристалла. Токовая цепь кристалла германия в первом случае разомкнута, а во втором случае замкнута. Это создает различные условия для взаимодействия излучения с поверхностным потенциальным барьером кристалла германия. При разомкнутой токовой цепи кристалла воздействие электрического поля волны на поверхностный потенциальный барьер германия [3] не может изменить концентрацию пар электрон—дырка, так как невозможно установление квазинейтральности в объеме кристалла. Это исключает проявление диффузионной дифференциальной емкости. Зарядная дифференциальная емкость поверхностного потенциального барьера изменяется с изменением его величины. При малой величине зарядной емкости эффективное взаимодействие электрического поля волны с поверхностным потенциальным барьером приведет к поглощению им излучения в процессе детектирования. Поэтому можно предположить, что аномальный характер зависимостей  $P_{np} = F(I)$  и  $P_{np} = F(T)$  обусловлен зависимостью зарядной емкости поверхностного потенциального барьера от концентрации свободных носителей заряда в объеме германия.

#### Список литературы

- [1] Бабенко С. П., Гершензон Е. М. // Полупроводниковые приборы и их применение Под ред. Я. А. Федотова. В. 10. М., 1963. С. 404—410.
- [2] Шеховцов Н. А., Вязьмитинов И. А., Пегрушин А. А. // ДАН УССР. Сер. А. Физ.-мат. и техн. науки. 1987. № 6. С. 55—57.
- [3] Пикус Г. Е. // Физика поверхности полупроводников / Под ред. Г. Е. Пикуса. М., 1959. С. 5—59.

Харьковский государственный  
университет им. А. М. Горького

Получена 11.03.1990  
Принята к печати 9.01.1991