

## ПОГЛОЩЕНИЕ ЭЛЕКТРОМАГНИТНОГО ИЗЛУЧЕНИЯ 54—78 ГГц СЛАБО ЛЕГИРОВАННЫМ *p*-ГЕРМАНИЕМ

Н. А. Шеховцов

Харьковский государственный университет, Харьков, Украина  
(Получена 24 февраля 1993 г. Принята к печати 24 мая 1993 г.)

Экспериментально исследована зависимость поглощения излучения диапазона частот 54—78 ГГц германием *p*-типа с удельным сопротивлением 48—50 Ом·см от концентрации пар электрон—дырка. Концентрация пар увеличивалась током инжекции  $n^+ - p$  и  $p^+ - p$ -переходов, а также температурой кристалла германия. Показано, что зависимость поглощения излучения от тока инжекции и от температуры при увеличении частоты от 54 до 78 ГГц вначале аномальная, затем изменяющаяся с нормальной на аномальную и далее нормальная. Нормальная зависимость характеризуется увеличением, а аномальная — уменьшением поглощения излучения с ростом концентрации пар электрон—дырка. Аномальный характер зависимости объясняется изменением эффективности взаимодействия излучения с поверхностным потенциальным барьером при увеличении концентрации пар электрон—дырка в объеме германия.

В [1] показано, что зависимость поглощения излучения диапазона частот 54—78 ГГц слабо легированным *n*-германием от концентрации пар электрон—дырка может быть аномальной или нормальной. С ростом концентрации пар электрон—дырка поглощение излучения увеличивается при нормальной зависимости и уменьшается при аномальной зависимости. Показано, что характер зависимости поглощения излучения от концентрации пар электрон—дырка при заданных размерах *n*-германия определяется частотой излучения. Полагается, что аномальная зависимость обусловлена изменением эффективности взаимодействия излучения с поверхностным потенциальным барьером *n*-германия.

На основании этого предположения зависимость поглощения излучения диапазона частот 54—78 ГГц слабо легированным *p*-германием от концентрации пар электрон—дырка также может быть аномальной. В связи с этим было исследовано поглощение излучения 54—78 ГГц германием *p*-типа с удельным сопротивлением 48—50 Ом·см. Показано, что характер зависимости поглощения излучения слабо легированным *p*-германием от концентрации пар электрон—дырка определяется концентрацией пар и частотой излучения.

Образцы германия *p*-типа в виде прямоугольников с размерами  $1.25 \times 1.35 \times 3.00$  мм<sup>3</sup> вырезались из монокристалла, шлифовались, травились в СР-4, промывались дистиллированной водой и сушились. На середине образца площадью  $1.35 \times 3.00$  мм<sup>2</sup> на плоскостях, совпадающих с (111), изготавливались  $n^+ - p$  и  $p^+ - p$ -переходы в виде полосок  $0.3 \times 3.00$  мм<sup>2</sup>. Таким образом, исследуемые образцы представляли собой  $n^+ - p - p^+$ -диоды, покрытые отверждающим лаком. Концентрацию пар электрон—дырка в поглощающей излучение *p*-области можно было увеличивать током инжекции и температурой. Размер *p*-области между  $n^+ - p$ - и  $p^+ - p$ -переходами обеспечивал достаточно эффективную модуляцию ее проводимости неравновесными парами электрон—дырка.

Диод помещался в отрезок 4-х миллиметрового волновода так, чтобы *p*-область максимально заполняла поперечное сечение волновода, а плоскости с  $n^+ - p$  и  $p^+ - p$ -переходами были параллельны широкому стенкам волновода. При этом

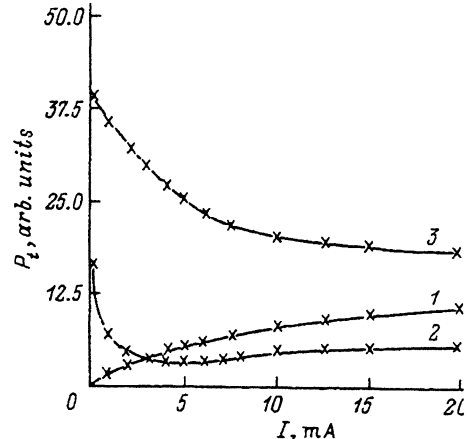


Рис. 1. Зависимость  $P_t = F(I)$ .  $P_0 = 86$  отн. ед.,  $T = 293$  К.  $f$ , ГГц: 1 — 54.5, 2 — 60, 3 — 76.

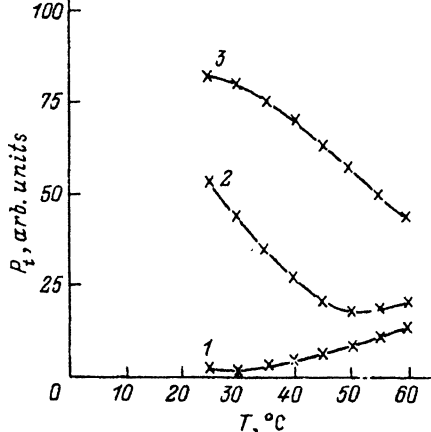


Рис. 2. Зависимость  $P_t = F(T)$ .  $P_0 = 150$  отн. ед.  $f$ , ГГц: 1 — 54.5, 2 — 60, 3 — 76.

полоски  $n^+$ - и  $p^+$ -областей были перпендикулярны узким стенкам волновода. Изолированные выводы от  $n^+$ - и  $p^+$ -областей укладывались в канавки на фланце волновода также, как в работе [1]. На длине кристалла германия вдоль волновода, равной 1.35 мм при изменении частоты излучения от 54 до 78 ГГц, укладывалось от  $0.6\lambda_e$  до  $1.1\lambda_e$ , где  $\lambda_e$  — длина волны в волноводе, заполненном германием.

Поглощение излучения  $p$ -областью  $n^+p-p^+$ -диодов исследовалось на установке, состоящей из генератора Г-142, аттенюатора, направленных ответвителей с детекторными секциями для падающей и отраженной мощности, отрезка волновода с диодом, согласователя и детекторной секции [1]. Вольт-ваттные характеристики всех трех детекторов типа Д-407, близкие к линейным, были идентичны. Поэтому величины мощности излучения, падающего на диод  $P_0$ , отраженного от диода  $P_r$  и прошедшего через диод  $P_t$ , были пропорциональны напряжениям на детекторах. С изменением частоты излучения согласование волноводного тракта с нагрузкой, которой служил детектор Д-407, изменяется. Поэтому об изменении процесса поглощения излучения  $p$ -областью  $n^+p-p^+$ -диода с ростом тока инжекции свидетельствовало изменение мощности  $P_r$ , а не ее величина.

Для изучения поглощения излучения слабо легированным  $p$ -германием были измерены характеристики  $P_t = F(I)$  и  $P_r = F(I)$  при  $P_0 = \text{const}$  и  $f = \text{const}$ , где  $I$  — ток инжекции  $n^+p-p^+$ -диода и  $f$  — частота излучения. Установлено, что характер зависимостей  $P_t = F(I)$  и  $P_r = F(I)$  не зависит от величины  $P_0$ . Мощность  $P_r$  с увеличением тока  $I$  до 60 мА изменялась незначительно. Поэтому можно полагать, что характер зависимости  $P_t = F(I)$  (рис. 1) обусловлен процессом поглощения излучения  $p$ -областью. На рис. 1 видно, что характер зависимости  $P_t = F(I)$  определяется частотой излучения  $f$ . При увеличении  $f$  от 54 до 78 ГГц зависимость  $P_t = F(I)$  вначале аномальная, затем изменяющаяся с нормальной на аномальную, и далее нормальная.

Для исключения возможного влияния постоянного электрического поля в  $p$ -области  $n^+p-p^+$ -диода на процесс поглощения излучения концентрация пар электрон—дырка в  $p$ -области увеличивалась повышением температуры диода  $T$ . Температура диода увеличивалась за счет нагрева волноводной секции с  $n^+p-p^+$ -диодом. Характер измеренных зависимостей  $P_t = F(T)$  и  $P_r = F(T)$  при  $P_0 = \text{const}$  и  $f = \text{const}$  не зависит от величины  $P_0$ . Мощность  $P_r$  с увеличением температуры  $T$  изменяется незначительно. Поэтому можно полагать, что зависимость  $P_t = F(T)$  (рис. 2) обусловлена поглощением излучения  $p$ -областью

диода. Характер зависимостей  $P_r = F(I)$  (рис. 1) и  $P_r = F(T)$  (рис. 2) при  $f = \text{const}$  одинаковый. Отсюда следует, что постоянное электрическое поле  $n^+ - p - p^+$ -диода не влияет на характер зависимости  $P_r = F(I)$ , т. е. на процесс поглощения излучения  $p$ -областью.

Таким образом, характер зависимости  $P_r = F(I)$  при  $P_0 = \text{const}$  и  $f = \text{const}$  определяется зависимостью поглощения излучения  $p$ -областью  $n^+ - p - p^+$ -диода от концентрации пар электрон—дырка в ней.

На исследованные зависимости практически не влияли резонансные свойства  $p$ -области  $n^+ - p - p^+$ -диода, так как длина  $p$ -области вдоль волновода на указанных частотах излучения не равна и не кратна  $0.5\lambda_c$ . При длине  $p$ -области вдоль волновода, равной или кратной  $0.5\lambda_c$ ,  $p$ -область представляет собой резонатор с низкой добротностью, помещенный в волновод. У исследуемого  $n^+ - p - p^+$ -диода  $p$ -область имеет расчетную резонансную частоту  $f_r = 69$  ГГц. Измеренные зависимости  $P_r = F(f)$  и  $P_r = F(T)$  при  $P_0 = \text{const}$ ,  $I = \text{const}$  и  $T = 293$  К показали наличие резонансного поглощения излучения. При  $I = 0$  и  $P_0 = 150$  отн. ед. с увеличением  $f$  от 68.3 до 68.6 ГГц  $P_r$  изменяется незначительно, а  $P_r$ , равная 88 отн. ед. при  $f = 68.3$  ГГц и 90 отн. ед. при  $f = 68.6$  ГГц, достигает минимума 73 отн. ед. при  $f_r = 68.45$  ГГц. Незначительное отличие расчетного и экспериментального значений частоты  $f_r$  указывает на резонансное поглощение излучения подувновоным германиевым резонатором в волноводе.

Зависимость поглощения излучения слабо легированным  $n$ -германием от концентрации пар электрон—дырка объясняется в [2] изменением эффективности взаимодействия излучения с поверхностным барьером. Поверхностные потенциальные барьеры у слабо легированного  $n$ - и  $p$ -германия отличаются незначительно, так как концентрация дырок в поверхностном слое значительно больше концентраций электронов и дырок в объеме [3]. Поэтому зависимость поглощения излучения слабо легированным  $p$ -германием от концентрации пар электрон—дырка также можно объяснить изменением эффективности взаимодействия излучения с поверхностным потенциальным барьером.

Электрическое поле электромагнитной волны  $H_{10}$  направлено перпендикулярно поверхностям  $p$ -области  $n^+ - p - p^+$ -диода, параллельным кристаллографической плоскости (111). Эти поверхности  $p$ -области изолированы от стенок волновода, т. е. токовая СВЧ цепь  $p$ -области разомкнута. Поэтому диффузионная емкость поверхностного потенциального барьера не проявляется. Зарядная емкость поверхностного потенциального барьера  $p^+ - p$ -перехода в случае слабо легированной  $p$ -области близка к зарядной емкости  $p^+ - i$ -перехода. Последняя, как показано в [4], определяется величиной потенциального барьера и при площади  $p^+ - i$ -перехода  $1 \text{ см}^2$  может иметь малую величину. При малой величине емкости поверхностного потенциального барьера электрическое поле СВЧ излучения эффективно взаимодействует с ним. В результате детектирования СВЧ излучения энергия основной частоты преобразуется в энергию гармоник. С увеличением номера гармоники увеличивается число длин волн в  $p$ -области в направлении распространения излучения. При этом поглощение энергии гармоники германием увеличивается. Поэтому поглощение излучения слабо легированным  $p$ -германием при взаимодействии излучения с поверхностным потенциальным барьером более сильное, чем в отсутствие этого взаимодействия.

С ростом тока инжекции  $n^+ - p - p^+$ -диода, т. е. с ростом концентрации пар электрон—дырка в  $p$ -области, величина ее поверхностного потенциального барьера уменьшается, а его зарядная емкость увеличивается. При этом шунтирующее действие емкости увеличивается, а эффективность взаимодействия излучения с поверхностным потенциальным барьером уменьшается.

Увеличение частоты излучения при заданных параметрах поверхностного потенциального барьера также уменьшает эффективность взаимодействия излучения с барьером.

Таким образом, при поглощении излучения слабо легированным *p*-германием действуют два механизма поглощения. Один из них — преобразование поверхностным потенциальным барьером энергии излучения в энергию гармоник с последующим поглощением ее объемом германия. Второй — поглощение излучения объемом германия без преобразования энергии излучения в энергию гармоник.

При заданных размерах кристалла слабо легированного *p*-германия и параметрах поверхностного потенциального барьера соотношение интенсивностей этих механизмов поглощения излучения определяется частотой излучения. С ростом концентрации пар электрон—дырка в объеме слабо легированного *p*-германия соотношение интенсивностей этих механизмов поглощения излучения изменяется. В результате этого зависимость  $P_i = F(I)$ , как и зависимость  $P_i = F(T)$ , получается или аномальной, или изменяющейся с нормальной на аномальную.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- [1] Н. А. Шеховцов. ФТП, 25, 813 (1991).
- [2] Н. А. Шеховцов. В кн.: Физические исследования с использованием миллиметрового и субмиллиметрового диапазонов, 12. Харьков (1991).
- [3] Г. Е. Пикус. В кн.: Физика поверхности полупроводников (под ред. Г. Е. Пикуса), 5. М. (1959).
- [4] Н. А. Шеховцов. В кн.: Физические исследования с использованием миллиметрового и субмиллиметрового диапазонов, 20. Харьков (1991).

Редактор В. В. Чалдышев

---