

05.2;09

©1993

СТАБИЛИЗАЦИЯ МОЩНОСТИ ИОНИЗИРУЮЩЕГО СВЧ ПОЛЯ В ТОНКИХ ПОЛУПРОВОДНИКОВЫХ ЭЛЕМЕНТАХ И ПЛЕНКАХ

В.Н. Чупис, О.А. Косыгин, Н.А. Дузовников, Е.М. Семенова

Изучение эффектов взаимодействия электромагнитного поля с ионизированной плазмой полупроводников обусловлено проблемами развития СВЧ техники коротковолнового диапазона, в частности, разработкой полупроводниковых измерительных управляющих приборов на высокие уровни мощности. Рассмотрение физических принципов управления параметрами СВЧ излучения на основе тонких, с толщиной порядка десятков микрон, полупроводниковых элементов и пленок представляет собой интерес в связи с переходом в КВЧ диапазон и миниатюризацией функциональных элементов волноведущих систем.

Рассмотренные в [1] и [2] управляемые ударной ионизацией резонансные полупроводниковые элементы имеют существенный недостаток — применение таких элементов требует использования трудноосуществимой в ряде случаев системы согласования возбуждения ударно-ионизированной плазмы в полупроводниковом элементе с поступлением на вход прибора мощного СВЧ импульса. По этой причине представляет интерес возможность создания пассивных ограничителей, использующих явление совоздействия сильного микроволнового излучения.

При анализе взаимодействия поля с ионизированным полупроводником как правило считают, что ударная ионизация однородна по объему полупроводника. Подобная физическая ситуация, очевидно, имеет место в случае ионизации очень тонких полупроводников или когда рассматривается распределение слабой ($E < E_n$) электромагнитной волны в плазме полупроводника, ионизируемого внешним полем.

При рассмотрении процесса самовоздействия сильной ионизирующей волны с достаточно протяженным полупроводником необходимо учитывать эффект самовоздействия, который заключается во взаимной корреляции параметров поля и плазмы неравновесных носителей полупроводника. Из-за снижения амплитуды высококачественного излучения при распространении в плазме полупроводника, уменьшается зависящая от поля как $\exp(-\alpha/E^2)$ средняя частота удар-

ной ионизации, что в данном случае приводит к значительно более глубокому проникновению электромагнитного поля в плазму, чем при однородной ударной ионизации.

Система уравнений, описывающая взаимодействие ионизирующего поля с полупроводником (п/п пластиной) в данном случае имеет следующий вид:

$$\frac{dE}{dz} = i\frac{\omega}{c}B; \quad -\frac{dB}{dz} = -i\frac{\omega}{c}E + \frac{4\pi}{c}j; \quad j = en\mu E.$$

В условиях ударной ионизации, зависящая от поля концентрация свободных носителей определяется выражением:

$$n = n_0 \left[1 - \gamma \exp(E^*/E_0)^2 \right]^{-1},$$

где E_0 — напряженность электрического поля в полупроводнике. Значения γ и E^* , зависящие от свойств конкретного полупроводника и частоты СВЧ поля могут быть найдены из кинетической теории или определены экспериментально [3]. Для InSb, например, при $\omega = 37$ ГГц $\gamma = 9.8 \cdot 10^4$ и $E^* = 1.2 \cdot 10^3$ В/см. Граничные условия на поверхностях полупроводниковой пластины ($z = 0, L$) записываются в стандартной форме

$$E_0 + E_r = E(0),$$

$$E_0 - E_R = B(0) = -i\frac{\omega}{c}\frac{dE(0)}{dz}E_\tau = E(L) = B(L) = -i\frac{\omega}{c}\frac{dE(L)}{dz},$$

где E_0, E_R, E_τ — амплитуды падающей, отраженной и прошедшей волн соответственно.

Расчетные графики зависимости $E(z)$ компенсированного InSb ($n_0 = 2.5 \cdot 10^{12}$ см⁻³, $T = 77$ К) при различных амплитудных значениях E_0 входного сигнала приведены на рис. 1.

Как показывает расчет, наиболее существенным фактором, определяющим распространение ионизирующей электромагнитной волны в условиях самовоздействия является логарифмический, а не экспоненциальный (при $n(z) = \text{const}$) спад амплитуды высокочастотного поля. Учитывая особенности полученного решения — резкое уменьшение поля вблизи границы полупроводникового элемента и дальнейший слабый спад амплитуды волны, можно, в принципе, построить использующий явление ударной ионизации ограничивающий полупроводниковый прибор, наиболее важной особенностью которого является слабая зависимость прошедшей мощности от уровня входного сигнала.

На рис. 1,б приведены полевые зависимости глубины проникновения электромагнитного поля в плазму полупроводника на частотах 37 и 140 ГГц. Видно, что с повышением

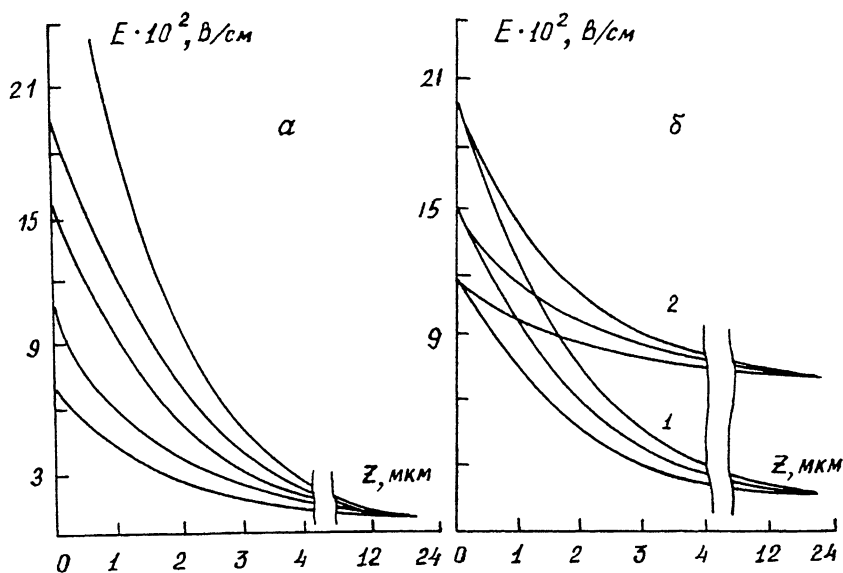


Рис. 1. Зависимости глубины проникновения ионизирующего поля в полупроводник от напряженности поля на поверхности полупроводника.

a — $\omega = 35$ ГГц; b — кривая 1 $\omega = 40$ ГГц, кривая 2 $\omega = 140$ ГГц.

частоты наблюдается увеличение глубины проникновения ионизирующего поля в плазму полупроводника, что в данном случае связано с ростом порогового поля для InSb на частотах $\omega > 40$ Гц (в этой области частот $\omega > 1/\tau$, τ — характерное время релаксации по импульсу и γ и E^* зависят от частоты действующего поля). Этот эффект, имеющий место на глубине развития процесса ударной ионизации, имеет обратный характер по отношению к обычному увеличению затухания с ростом частоты.

Возможность стабилизации СВЧ мощности в полупроводниковых элементах с толщиной, равной характерной глубине проникновения ионизирующего поля в полупроводник, подтверждается экспериментально. Зависимость $E(z)$ имеет универсальный характер и для различных полупроводников определяется только значениями постоянных γ , E^* . Использование в конкретных устройствах узкозонных полупроводников, к которым относится InSb, требует охлаждения этих устройств до температуры жидкого азота, поэтому с практической точки зрения представляет интерес создание использующих эффект стабилизации аттенюаторов и переключателей на широкозонных полупроводниках типа GaAs.

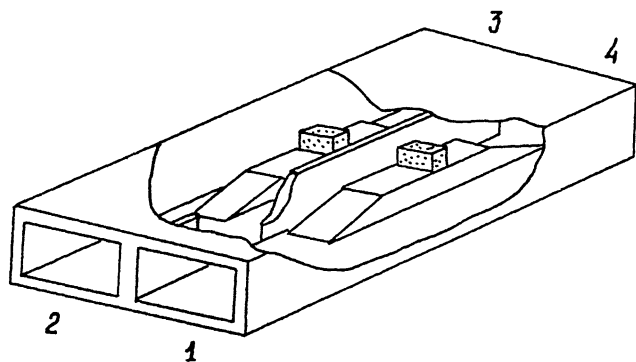


Рис. 2. Двойной волноводный мост с полупроводниковыми элементами.

Для исследования возможности практической реализации рассмотренного эффекта совоздействия сильного СВЧ поля был построен двойной волноводный мост 8-мм диапазона специальной конструкции (рис. 2). В центре моста в обоих его плечах крепились вставки, обеспечивающие плавный переход на П-образный волновод с целью повышения напряженности поля в области вставок. На вставках размещались полупроводниковые элементы из GaAs ($n = 5 \cdot 10^{17} \text{ см}^{-3}$, $\kappa = 16$) в форме тонкой прямоугольной пластины ($L = 150 \text{ мкм}$). При допороговых значениях напряженности поля в области полупроводника, СВЧ волна с незначительным ослаблением (в данном случае не более 1,2 дБ) проходит в плечо 4 моста. При развитии в полупроводнике ударной ионизации резко возрастает коэффициент отражения и волна отражается в плечо 2. На полупроводниковые пластины подавались от СВЧ генератора импульсы длительностью 0,1–0,5 мкс и мощностью до 100 кВт. При мощности в импульсе $P = 1,8 \text{ кВт}$ рост мощности, прошедшей в плечо 4 моста прекращается, и в дальнейшем (при $P = 1,8 - 100 \text{ кВт}$) практически не зависит от уровня входного сигнала. Экспериментальные результаты в данном случае хорошо согласуются с теоретическим расчетом. При импульсной мощности 1,8 кВт напряженность поля в области полупроводника составляет $2,7 \cdot 10^3 \text{ В/см}$, т.е. совпадает с пороговым значением E_n для GaAs.

Список литературы

- [1] Чупис В.Н., Черкасов В.Е., Калашников А.В., Царев В.П. // Письма в ЖТФ. 1989. Т. 15. В. 21. С. 4-7.
- [2] Усанов Д.А., Феклистов Б.Б., Вагарин А.Ю. // Радиотехника и электроника. 1979. Т. 24. В. 8. С. 1681-1683.
- [3] Чупис В.Н., Кац Л.И. // ФТП. 1985. Т. 17. В. 7. С. 1288-1296.

Научно-исследовательский
институт механики и физики
Саратовского государственного
университета им.Н.Г.Чернышевского

Поступило в Редакцию
14 сентября 1993 г.

