

05.2;09

## ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ОСОБЕННОСТЕЙ УДАРНОЙ ИОНИЗАЦИИ В ТОНКИХ ПОЛУПРОВОДНИКОВЫХ ПЛЕНКАХ ДЛЯ МОДУЛЯЦИИ ЭЛЕКТРОМАГНИТНОГО ИЗЛУЧЕНИЯ В КОРОТКОВОЛНОВОЙ ЧАСТИ СВЧ ДИАПАЗОНА

© Л.И.Кац, В.Н.Чупис, А.Ю.Сомов, Е.М.Семенова

Построение эффективных полупроводниковых модуляторов и ограничителей на высокие уровни мощности в КВЧ (крайне высокочастотном) диапазоне — одна из важных проблем развития и освоения коротковолновой части СВЧ диапазона. Исследования в этой области стимулируют поиск новых физических эффектов взаимодействия КВЧ излучения с полупроводниковой плазмой.

Одна из основных проблем создания эффективных управляющих приборов в КВЧ диапазоне в данном случае состоит в необходимости учета двух трудно сочетаемых условий — минимальности вносимого ослабления и достижения высокого уровня ограничения во “включенном”, рабочем состоянии. По этой причине значительный интерес представляет исследование эффектов взаимодействия коротковолнового излучения с неравновесной ионизированной плазмой в тонких полупроводниках и полупроводниковых пленках [1]. Стационарная ударная ионизация в полупроводниках, как показывают результаты исследований [2-3], позволяет эффективно управлять параметрами СВЧ излучения в миллиметровом и субмиллиметровом диапазонах.

В этом направлении наибольший интерес представляет исследование взаимодействия электромагнитной волны с пространственно неоднородной плазмой в тонких, с толщиной, меньшей характерной диффузионной длины, полупроводниковых пленках [4]. Объемное распределение ионизированных носителей в таких полупроводниках существенным образом связано с особенностями возбуждения неравновесной плазмы в тонких полупроводниках (влиянием поверхности на набор электронами энергии ионизации и явлением поверхностной рекомбинации) и позволяет в широких пределах управлять отражательными характеристиками ионизированных полупроводниковых пленок в КВЧ диапазоне [1].

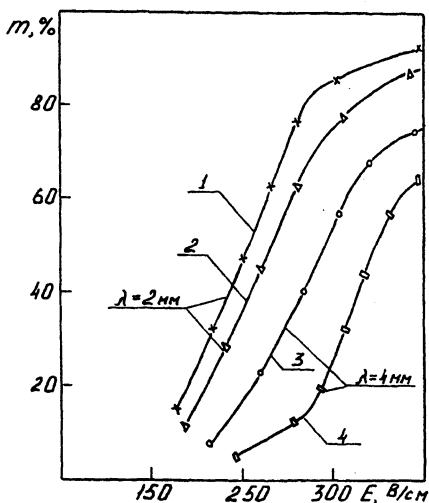


Рис. 1. Зависимости коэффициента глубины модуляции от напряженности ионизирующего электрического поля: 1, 3 —  $d = 100$  мкм; 2, 4 —  $d = 50$  мкм.

Эти данные послужили основанием для проведения эксперимента по импульсной модуляции коротковолнового излучения с длиной волны  $\lambda = 2$  мм и  $\lambda = 4$  мм с помощью эффекта ударной ионизации. В экспериментах использовались полупроводниковые образцы  $n$ -InSb ( $n = 2.8 \cdot 10^{12}$  см $^{-3}$ ,  $\mu = 5 \cdot 10^5$  см $^2$ /В·с) с толщиной ( $d$ ) 50 и 100 мкм.

Полупроводниковая пластина на диэлектрической подложке располагалась в стандартном волноводном тракте перпендикулярно к оси волновода. Волноводная секция с полупроводником, находящимся при температуре жидкого азота, помещалась между полюсами магнита. На полупроводниковый образец, перекрывающий стандартный волновод сечением  $S = 1.2 \cdot 2.4$  мм $^2$  ( $\lambda = 2$  мм) подавались импульсы тока (длительностью  $\tau_u = 1$  мкс при скважности  $Q = 1000$ ), обеспечивающие напряженность электрического поля в полупроводнике до 350 В/см, при  $T = 77$  К.

Оценки изменения температуры решетки при импульсном электрическом воздействии, проведенные в соответствии с работой [5], показали, что при  $E = 100$  В/см ( $\tau_u = 1$  мкс) повышение температуры образца вследствие омического нагрева составляет  $\Delta T = 0.3$  К, а при  $E = 250$  В/см  $\Delta T = 2$  К при толщине образца 100 мкм.

Результаты эксперимента представлены на рис. 1. Видно, что с уменьшением толщины при  $d < L_D$  ( $L_D$  — характерная диффузионная длина; для  $n$ -InSb —  $L_D$  150 мкм) су-

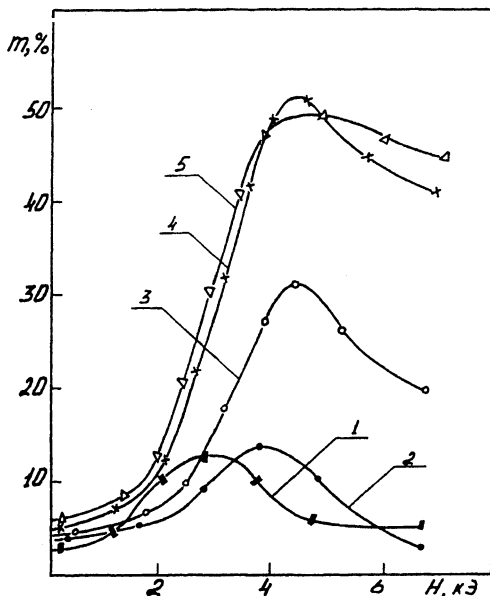


Рис. 2. Зависимость коэффициента модуляции СВЧ волны от напряженности внешнего магнитного поля ( $d = 100$  мкм): 1 —  $E = 100$  В/см, 2 —  $E = 150$  В/см, 3 —  $E = 185$  В/см, 4 —  $E = 250$  В/см, 5 —  $E = 300$  В/см.

щественно уменьшается  $m$ , что связано с диффузией носителей из области разогрева к поверхности и поверхностной рекомбинацией. Максимальная величина глубины модуляции в данном случае при  $\lambda = 2$  мм составляет  $\sim 90\%$ , при  $\lambda = 4$  мм  $m \sim 70\%$ , величина вносимых потерь  $\alpha \simeq 3.5$  дБ ( $\lambda = 2$  мм,  $d = 100$  мкм). Подобное значение  $\alpha$  в основном определялось отсутствием согласования для образца с  $\epsilon = 17$ , полностью перекрывающего волновод. Нанесение на полупроводник согласующих диэлектрических слоев, согласно оценкам [6], позволяет существенно (на порядок) повысить величину  $\alpha$ .

Для изучения влияния магнитного поля на процесс модуляции на указанном принципе проводился эксперимент при  $\lambda = 8$  мм для  $n = 2.8 \cdot 10^{12}$  см $^{-3}$ ,  $\mu = 5 \cdot 10^5$  см $^2$ /В  $\cdot$  с,  $\nu = 2.7 \cdot 10^{11}$  с $^{-1}$  и  $\omega_p = 7.1 \cdot 10^{11}$  с $^{-1}$  ( $\nu$  — частота релаксации по импульсу,  $\omega_p$  — плазменная частота).

В эксперименте проводились измерения зависимостей прошедшей через образец мощности и коэффициента глубины модуляции электромагнитной волны импульсами электрического поля от значений приложенных электрических и магнитных полей. Результаты эксперимента представлены на рис. 2.

Кривые 1–5 иллюстрируют результаты измерения  $m$  (%) как функции внешнего электрического поля. Значительное возрастание  $m$  при  $E > 200$  В/см (кривые 3–5) объясняется ростом отношения  $\frac{\omega_p}{\nu}$  в результате развития ударной ионизации. В данном случае в тонких полупроводниках при  $d < L_D$  плазменная частота существенным образом зависит от напряженности внешнего магнитного поля [1]. Магнитное поле (в геометрии Фарадея  $\mathbf{H} \parallel \mathbf{E} \perp \mathbf{K}$ ) позволяет компенсировать влияние поверхности на процесс ударной ионизации (ионизированная плазма при  $d < L_D$  “отжимается” от поверхности полупроводниковой пластины, что эквивалентно увеличению во внешнем магнитном поле  $\omega_p$ ).

Проведенные исследования зависимости  $m(H)$  в широком диапазоне изменения напряженности внешнего магнитного поля отражают основные физические закономерности взаимодействия коротковолнового излучения с замагниченной плазмой тонких полупроводников и полупроводниковых пленок. Как следует из приведенных на рис. 2 зависимостей, “выбор” соответствующих значений напряженности магнитного поля позволяет использовать в качестве эффективных модуляторов КВЧ диапазона тонкие полупроводниковые пленки с высоким значением глубины модуляции (в режиме ударной ионизации) и малым начальным ослаблением.

Верхний рабочий предел импульсной мощности подобных систем (в отличие от СВЧ диодов) ограничивается только средней рассеиваемой мощностью и может составлять десятки киловатт в импульсе.

### Список литературы

- [1] Альтшуллер Е.Ю., Кац Л.И., Чупис В.Н. // Радиотехника и электроника. 1992. № 7. С. 560–566.
- [2] Басс Ф.Г., Гуревич Ю.Г. Горячие электроны и сильные электромагнитные волны в плазме полупроводников и газового разряда. М.: Наука, 1975. 368 с.
- [3] Чупис В.Н., Черкасов В.Е., Калашников А.В., Царев В.П. // Письма в ЖТФ. 1989. Т. 15. В. 21. С. 4–7.
- [4] Чупис В.Н., Косыгин О.А., Дутоеников Н.А., Семенова Е.М. // Письма в ЖТФ. 1993. Т. 19. В. 23. С. 69–73.
- [5] Владимиров В.В., Горшков В.И. // ЖЭТФ. 1976. № 4. В. 70. С. 1490–1495.
- [6] Гершензон Е.М., Литвак-Горская Л.Б. // Полупроводниковые приборы и их применение. Методы определения параметров полупроводников на СВЧ. М.: Сов. радио, 1970. 275 с.

Поступило в Редакцию  
21 августа 1995 г.