

05:09

Особенности скин-эффекта при распространении мощного КВЧ излучения в частично ионизированной полупроводниковой плазме

© О.А. Косыгин, В.Н. Чупис, А.Ю. Сомов

Научно-исследовательский институт механики и физики Саратовского государственного университета им. Н.Г. Чернышевского, 410071 Саратов, Россия

(Поступило в Редакцию 15 мая 1998 г.)

Проведено исследование особенностей распространения сильной электромагнитной волны в пространственно неоднородной плазме тонких полупроводниковых элементов и пленок. Исследовано влияние поверхностной рекомбинации и внешнего магнитного поля на глубину проникновения ионизирующего поля в полупроводниковую плазму.

Исследование эффектов взаимодействия электромагнитного поля с ионизированной плазмой полупроводников связано с проблемами развития СВЧ техники коротковолнового диапазона (КВЧ), в частности созданием измерительных и управляющих устройств на высокие уровни мощности. Как показывают результаты исследований [1,2], стационарная ударная ионизация в полупроводниках позволяет эффективно управлять параметрами КВЧ излучения.

В этом направлении наибольший интерес представляет исследование взаимодействия сильной электромагнитной волны с пространственно неоднородной плазмой в тонких (с толщиной, меньшей характерной диффузионной длины) полупроводниковых элементах [3,4]. В таких полупроводниках диффузия высокоэнергетических носителей из области разогрева оказывает существенное влияние на величины пороговых полей и электродинамические характеристики тонкого полупроводникового элемента [5]. По этой причине в тонких полупроводниках наблюдается ряд новых явлений, связанных с влиянием поверхности на распределение носителей в объеме полупроводника и соответственно на взаимодействие сильного электромагнитного поля с тонким полупроводником [6]. В работе [3] проведен теоретический и экспериментальный анализ особенностей скин-эффекта при распространении коротковолнового ионизирующего излучения в полупроводниковой плазме. В частности, установлено, что глубина проникновения ионизирующего поля в полупроводник практически не зависит от его амплитуды на поверхности, а определяется физическими характеристиками полупроводникового материала. Значительный интерес представляет исследование зависимости глубины проникновения сильного поля в полупроводник от свойств поверхности, в частности от скорости поверхностной рекомбинации. По аналогии с данными работ [4,6] можно ожидать, что поверхностная рекомбинация существенным образом влияет на характер распространения сильного КВЧ излучения.

В связи с этим в данной работе проведено исследование зависимости глубины проникновения ионизирующего

поля в полупроводник от скорости поверхностной рекомбинации и индукции магнитного поля.

Система уравнений, описывающая взаимодействие ионизирующего поля с полупроводником, в данном случае имеет следующий вид:

$$\frac{d^2 E}{dz^2} - \frac{\omega_p^2}{c^2} \frac{n}{n_0} E = 0, \quad D \frac{d^2 n}{dz^2} + \nu_i n - \nu_r n - \nu_r n_0 = 0,$$

$$\frac{\nu_i}{\nu_r} = G \exp \left\{ - \left(\frac{E^*}{E} \right)^2 \right\}, \quad (1)$$

где E — напряженность электромагнитного поля в полупроводнике; ω_p — плазменная частота; c — скорость света; D — коэффициент диффузии; ν_i , ν_r — средние частоты у данной ионизации и рекомбинации.

Значения G и E^* , зависящие от свойств конкретного полупроводника и частоты ионизирующего СВЧ поля,

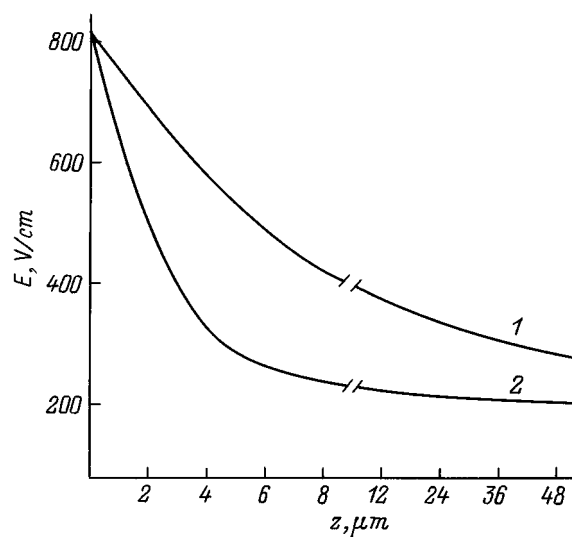


Рис. 1. Полевые зависимости глубины проникновения ионизирующего излучения в плазму полупроводника: $P_s = 10^6$ cm/s (1), 0 (2).

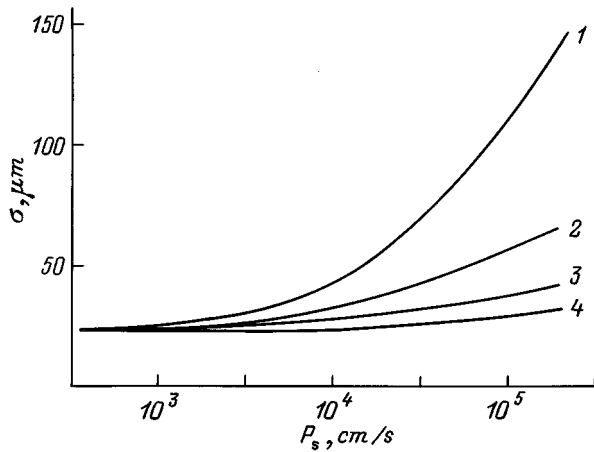


Рис. 2. Зависимость глубины проникновения ионизирующего излучения в плазму: $B = 0$ (1), 0.1 (2), 0.2 (3), 0.3 Т (4).

могут быть определены экспериментально или из кинетической теории. Например, для InSb при $f = 37$ GHz $G = 9.8 \cdot 10^4$, $E^* = 1.2 \cdot 10^3$ V/cm [6]. При решении связанной системы уравнений (1) на границе полупроводникового элемента задавались начальные значения напряженности электромагнитного поля и концентрации носителей. Полупроводниковая пластина разбивалась на N параллельных слоев в плоскости z , в пределах каждого слоя значение концентрации считалось постоянным, а на границах слоев сшивались тангенциальные компоненты напряженности электромагнитного поля. Результаты расчета зависимости $E(z)$ для InSb ($n_0 = 2.8 \cdot 10^{12}$ cm $^{-3}$, $T = 77$ K) приведены на рис. 1.

Как показывает расчет, поверхностная рекомбинация изменяет характер распространения электромагнитной волны. В данном случае на счет "обеднения" приповерхностного слоя носителей заряда ионизирующее поле проникает в плазму полупроводника на значительно большую глубину (кривая 1 на рис. 1).

На рис. 2 приведены зависимости глубины проникновения электромагнитного поля δ_{HF} в плазму полупроводника при различных значениях скорости поверхностной рекомбинации P_s .

В данном случае с увеличением скорости поверхностной рекомбинации уменьшается концентрация неравновесных носителей вблизи поверхности полупроводника и соответственно плазменная частота, что приводит к увеличению глубины проникновения ионизирующего поля в плазму.

Как и в [4], в данном случае внешнее магнитное поле в геометрии Фойгта $B \uparrow \uparrow E \perp k$ позволяет уменьшить влияние поверхности на распространение ионизирующего поля в полупроводниковой плазме (рис. 2). Физическая природа явления состоит в том, что с увеличением индукции электроны "закручиваются" вокруг силовых линий магнитного поля и ионизированная плазма "отжимается" от поверхности полупроводника, что эквивалентно уменьшению во внешнем магнитном поле характерной

диффузионной длины. Вследствие этого при индукции магнитного поля $B > 0.2$ Т поверхностная рекомбинация практически не оказывает влияния на глубину проникновения ионизирующего поля в полупроводник (кривые 2–4 на рис. 2).

Рассмотренные особенности взаимодействия сильного электромагнитного излучения с тонким полупроводником, в частности зависимость ω_p и глубины проникновения ионизирующего поля в полупроводниковую плазму от индукции внешнего магнитного поля, имеют принципиальное значение для тонких полупроводников и должны приниматься во внимание при разработке управляющих и измерительных устройств на высокие уровни мощности в коротковолновой части СВЧ диапазона.

Список литературы

- [1] Басс Ф.Г., Гуревич Ю.Г. Горячие электроны и сильные электромагнитные волны в плазме полупроводников и газового разряда. М.: Наука, 1975. 368 с.
- [2] Усанов Д.А., Феклистов Б.Б., Вагарин А.Ю. // РИЭ. 1979. Т. 24. № 8. С. 1681–1683.
- [3] Чупис В.Н., Косыгин О.А., Духовников Н.А., Семенова Е.М. // Письма в ЖТФ. 1993. Т. 19. Вып. 8. С. 69–73.
- [4] Чупис В.Н., Сомов А.Ю., Косыгин О.А., Семенова Е.М. // Письма в ЖТФ. 1995. Т. 21. Вып. 10. С. 16–19.
- [5] Чупис В.Н., Кац Л.И. // ФТП. 1983. Т. 17. Вып. 11. С. 1288–1296.
- [6] Альтшуллер Е.Ю., Кац Л.И., Чупис В.Н. // РИЭ. 1992. Т. 37. № 3. С. 560–566.