

# НЕКОТОРЫЕ СВОЙСТВА МАГНИТОДИОДОВ, ЧУВСТВИТЕЛЬНЫХ К НАПРАВЛЕНИЮ МАГНИТНОГО ПОЛЯ

Г. А. ЕГИАЗАРЯН, Г. А. МНАЦАКАНЯН, А. Х. АВАГЯН

Исследована зависимость дифференциальной комплексной проводимости магнитодиодов, чувствительных к направлению магнитного поля, от частоты электрического сигнала при разных уровнях инжекции и значениях магнитной индукции. Показано, что реактивная составляющая импеданса представляет собой отрицательную емкость, которая соответствует индуктивности.

Возникшая в последние годы тенденция к разработке и применению в науке и технике различных элементов и устройств на основе магниточувствительных приборов выдвинула в число актуальных задач исследование частотных свойств магнитодиодов. При этом особый интерес представляет изучение свойств магнитодиодов при работе их в импульсном режиме и на малом переменном гармоническом сигнале электрического поля.

Магнитодиод, как новый высокочувствительный датчик магнитного поля, представляет собой полупроводниковый прибор с  $p$ - $n$ -переходом и невыпрямляющим контактом, между которыми находится область высокоомного полупроводника толщиной в несколько диффузионных длин носителей тока [1, 2]. Эквивалентную схему магнитодиода можно представить в виде магнитосопротивления с последовательно включенным усилителем.

В настоящее время выполнено большое число работ по исследованию частотных свойств длинных  $p$ - $n$ - $p^+$  ( $p^+$ - $p$ - $n$ )-структур в режиме двойной инжекции [3]. Однако аналогичные работы по магнитодиодам практически отсутствуют. В работах [4, 5] фирмой «Сони» сообщается лишь о частотных характеристиках разработанных германиевых и кремниевых магнитодиодов. В работе [6] представлены частотные характеристики германиевых магнитодиодов при различных сопротивлениях нагрузки в переменных магнитных полях малой амплитуды.

В настоящей работе приводятся результаты исследования зависимостей дифференциальной комплексной проводимости  $Y$  и дифференциального комплексного сопротивления  $Z$  кремниевых магнитодиодов, чувствительных к направлению магнитного поля, от частоты гармонического электрического сигнала при различных уровнях инжекции и напряженностях магнитного поля. Важность исследований  $Y$  и  $Z$  обусловлена тем, что на базе магнитодиодов могут быть созданы твердотельные схемы с большим значением индуктивности при достаточно большой добротности, которые могут управляться магнитным полем.

Магнитодиоды изготавливались на пластинах кремния  $p$ -типа с удельным сопротивлением  $\rho \geq 20$  кОм см. Они имели  $n$ - $p$ - $p^+$ -структуру,  $n$ - и  $p^+$ -области формировались методом ионного легирования соответственно фосфора и бора и методом сплавления соответственно сплава золота с

сурьмой и алюминия. Статические вольт-амперные характеристики магнитодиодов, изготовленных двумя методами, были аналогичными.

Измерения проводились на малом переменном гармоническом сигнале в диапазоне частот  $0 \div 10^5$  Гц в магнитных полях с индукцией в диапазоне  $0 \div 8$  кГс.

Типичная зависимость дифференциальной комплексной проводимости от частоты сигнала при различных уровнях инжекции и  $B = 0$  приведена на рис. 1. Как видно из рисунка, дифференциальная комплексная проводимость магнитодиода при низких частотах ( $1 \div 10^3$  Гц) не изменяется. С увеличением частоты дифференциальная проводимость быстро уменьшается. При частоте измерительного сигнала  $5 \cdot 10^4$  Гц дифференциальная проводимость достигает минимума, затем слабо растет с последующим стремлением при высоких частотах к значению проводимости диода на постоянном токе. Из рисунка также следует, что для больших уровней инжекции дифференциальная проводимость значительно больше, а дифференциальный импеданс соответственно меньше.

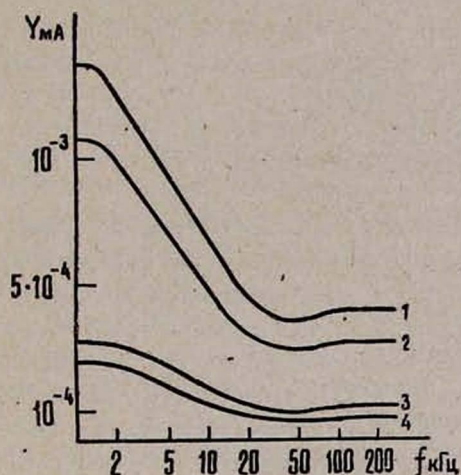


Рис. 1.

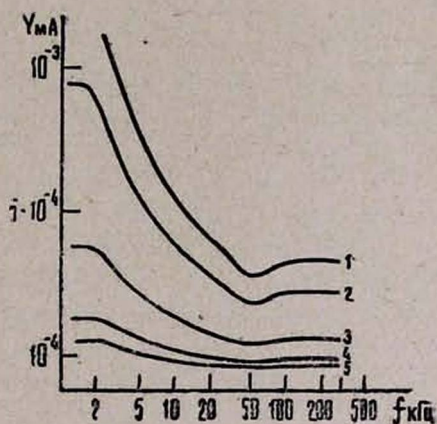


Рис. 2.

Рис. 1. Зависимость дифференциальной комплексной проводимости магнитодиода от частоты сигнала при  $B = 0$  и токах: 1—5 мА, 2—3 мА, 3—1 мА, 4—0,5 мА.

Рис. 2. Зависимость дифференциальной комплексной проводимости магнитодиода от частоты сигнала при разных значениях магнитной индукции: 1—0 кГс, 2—1 кГс, 3—2 кГс, 4—3 кГс, 5—3,5 кГс.

Из вышеизложенного следует, что электрические свойства магнитодиода при  $B = 0$  определяются частотой переменного сигнала. Это объясняется тем, что при увеличении частоты изменения концентраций инжектированных носителей тока не успевают следовать за переменным электрическим сигналом и при достаточно высоких частотах амплитуды переменных составляющих концентраций должны стремиться к нулю. В результате при высоких частотах квазинейтральная область диода, на которую падает все приложенное напряжение, имеет проводимость, близкую к

проводимости диода на постоянном токе. При низких частотах концентрации инжектированных носителей, находясь в фазе с переменным сигналом, безынерционно следуют за напряжением, приложенным к магнитодиоду. Таким образом, при заданной амплитуде переменного напряжения колебания тока в области низких частот происходят с гораздо большей амплитудой, чем при высоких. Отсюда следует, что низкочастотная инжекционная проводимость базы магнитодиода должна превышать высокочастотную, т. е. дифференциальная комплексная проводимость  $Y$  при низких частотах значительно больше, чем при высоких частотах.

На рис. 2 представлена зависимость  $Y$  магнитодиода от частоты переменного сигнала при различных магнитных полях одного направления и фиксированном напряжении, соответствующем  $J = 3$  мА и  $B = 0$ . С ростом магнитной индукции  $Y$  убывает при всех исследованных частотах измерительного сигнала. В области частот  $f < 3 \cdot 10^4$  Гц  $Y$  изменяется сильнее, чем при высоких частотах. Характер частотной зависимости  $Y$  и  $Z$  при  $B \neq 0$  аналогичен частотной зависимости  $Y$  и  $Z$  при  $B = 0$ . При достаточно больших частотах величины  $Y$  и  $Z$  при  $B \neq 0$  соответствуют проводимости и импедансу магнитодиода на постоянном токе в том же магнитном поле. При больших значениях магнитной индукции ( $B \geq 3$  кГс) частотная зависимость  $Y$  ослабевает. Для больших частот изменение  $Y$  с ростом магнитной индукции уменьшается. Аналогичные закономерности наблюдаются и при токах, полученных в условиях высокого уровня инжекции.

Вышеуказанные зависимости качественно можно объяснить процессами, происходящими и при  $B = 0$ . Количественные отличия объясняются тем, что в магнитном поле при постоянном напряжении на магнитодиоде уровень инжекции в базе уменьшается, вследствие чего его комплексная проводимость на высоких частотах падает. В области низких частот концентрации инжектированных носителей находятся в фазе с переменным сигналом, и вследствие магнитодиодного эффекта колебания тока происходят с меньшей амплитудой, чем при  $B = 0$ . В итоге дифференциальная комплексная проводимость магнитодиода при  $B = 0$  значительно ниже во всем диапазоне переменного сигнала.

Приведенные результаты показывают, что как низкочастотная ( $f < 2 \cdot 10^3$  Гц), так и высокочастотная ( $f > 7 \cdot 10^4$  Гц) дифференциальная комплексная проводимость (соответственно импеданс) магнитодиода практически не зависит от частоты сигнала. Это дает возможность использовать магнитодиоды в цепях переменного тока при высоких частотах, хотя их магниточувствительность при этом меньше, чем в области низких частот, но не меньше, чем при постоянном токе.

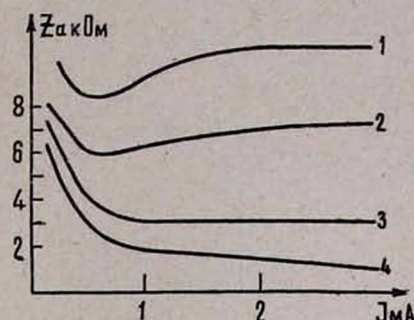
В области низких частот магнитодиоды характеризуются значительной магниточувствительностью даже при малых значениях магнитной индукции. Это, видимо, связано с сильной зависимостью динамического сопротивления, возникающего в длинных диодах при низких частотах, от величины магнитного поля. В области средних частот комплексная проводимость и импеданс сильно изменяются. Это позволяет использовать магни-

тодиоды в схемах, где требуются элементы с частотно-зависимыми значениями параметров.

Для противоположного направления магнитного поля ( $B < 0$ ), при котором магниточувствительность меньше, наблюдаются качественно такие же закономерности.

На рис. 3 представлена зависимость активной составляющей  $Z_a$  дифференциального комплексного импеданса от тока через магнитодиод при  $B \geq 0$  для частоты измерительного сигнала  $f = 10^3$  Гц. Как видно из ри-

Рис. 3. Зависимость активной составляющей импеданса магнитодиода от тока при разных значениях магнитной индукции: 1—3,5 кГс, 2—2,5 кГс, 3—1,5 кГс, 4—0 кГс.



сунка, при больших уровнях инжекции активная составляющая  $Z_a$  меньше. С увеличением комплексного импеданса при  $B \neq 0$  увеличивается и его активная составляющая  $Z_a$ . Исследования показали, что при низких частотах ( $f < 10^3$  Гц) активные составляющие дифференциального импеданса  $Z_a$  и дифференциальной проводимости  $Y_a$  практически не изменяются с частотой. При этом  $Z_a$  остается существенно меньше его статического сопротивления. С ростом частоты в области частот ( $10^3 \div 10^4$  Гц)  $Z_a$  быстро увеличивается, достигает максимума и затем незначительно убывает, следовательно,  $Y_a$  быстро уменьшается, достигая минимума, с дальнейшим незначительным возрастанием.

Исследование зависимости реактивной составляющей импеданса  $Z_r$  от напряжения смещения на магнитодиоде при  $B = 0$  для разных частот измерительного сигнала показало, что реактивная составляющая имеет емкостный характер. При увеличении напряжения для некоторых частот наблюдается смена знака реактивной составляющей, т. е. она представляет собой отрицательную емкость (рис. 4). По знаку фазового сдвига, регистрируемого фазовым детектором, отрицательная емкость эквивалентна индуктивности. Увеличение отрицательной емкости свидетельствует о росте инжекции, приводящей к модуляции проводимости базовой области.

Полученные значения исследуемых параметров соответствуют параллельной эквивалентной схеме магнитодиода. Был проведен пересчет параллельной эквивалентной схемы магнитодиода в последовательную схему с индуктивностью  $L = 1/\omega^2 Z_r$ . Расчет проводился по формулам

$$Z_a^* = \frac{Z_a}{1 + \omega^2 Z_a^2 Z_r^2}, \quad Z_r^* = \frac{Z_a^2 Z_r}{1 + \omega^2 Z_a^2 Z_r^2}.$$

При частоте сигнала  $f = 10^3$  Гц для различных значений магнитной индукции зависимость  $Z_a^*$  от тока аналогична зависимости  $Z_a$  от тока. На

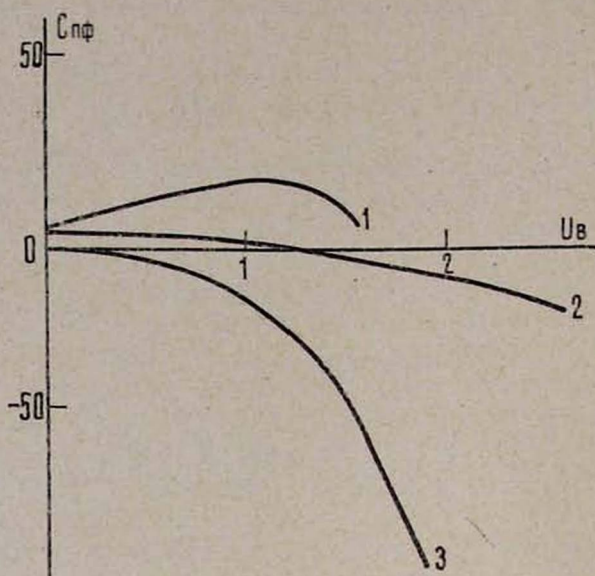


Рис. 4. Зависимость реактивной составляющей от напряжения на магнитодиоде при разных частотах измерительного сигнала: 1—1 кГц, 2—40 кГц, 3—10 кГц.

рис. 5 представлена зависимость реактивной (индуктивной) составляющей импеданса  $Z_r^*$  от прямого тока при разных значениях магнитной индукции и  $f = 10^3$  Гц.

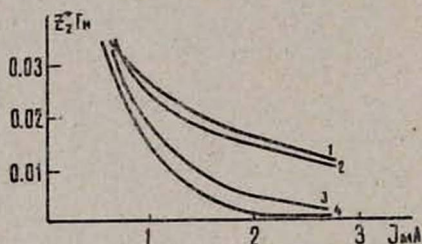


Рис. 5. Зависимость реактивной составляющей импеданса магнитодиода от тока для разных значений магнитной индукции: 1—3,5 кГс, 2—2,5 кГс, 3—2,5 кГс, 4—0 кГс.

Индуктивная составляющая импеданса в области частот  $f > 10^3$  Гц возрастает, достигает максимума и далее убывает с частотой. Величина индуктивности зависит не только от частоты сигнала, но и от уровня инжекции и величины магнитной индукции, что дает возможность управлять величиной индуктивности магнитодиода с помощью магнитного поля. Изменения индуктивности магнитодиода с изменением напряжения смещения, магнитного поля и частоты сигнала указывают на возможность применения их в качестве полупроводниковой индуктивности.

Выявление закономерностей в исследуемых зависимостях активных и реактивных составляющих дифференциального комплексного импеданса от частоты, уровня инжекции и магнитного поля можно объяснить особенностями модуляции проводимости базы магнитодиода. Однако для полного

понимания физических процессов, приводящих к вышеуказанным закономерностям, требуются дополнительные исследования.

Поступила 29.XI.1978

### ЛИТЕРАТУРА

1. В. И. Стафеев. ФТТ, 1, 841 (1959).
2. Г. А. Егiazарян и др. ФТП, 9, 1259 (1975).
3. В. М. Арутюнян. Генерационно-рекомбинационные эффекты и двойная инжекция в полупроводниках, Ереван, 1978.
4. Т. Ямада. Труды Международной конференции по физике полупроводников, М., 2, 711 (1969).
5. M. Arai, T. Yamada. Sil. Magnetodiode, J. Japan Soc. Appl. Phys. Suppl., 40, 93 (1971).
6. J. Betko. Sol. St. Electron, 14, 1059 (1971).

### ՄԱԳՆԵՍԱԿԱՆ ԴԱՇՏԻ ՈՒՂՂՈՒԹՅԱՆ ՆԿԱՏՄԱՍԲ ԶԳԱՅՈՒՆ ՄԱԳՆԵՍԱԴԻՈԴԵՆՐԻ ՈՐՈՇ ՀԱՏԿՈՒԹՅՈՒՆՆԵՐԸ

Հ. Հ. ՆՂԻԱԶԱՐՅԱՆ, Գ. Ա. ՄՆԱՏԱԿԱՆՅԱՆ, Ա. Խ. ԱՎԱԳՅԱՆ

Հետազոտվել է մագնիսական դաշտի ուղղության նկատմամբ զգայուն մագնիսադիոդների դիֆերենցիալ կոմպլեքս հաղորդականության կախվածությունը էլեկտրական ազդանշանի հաճախությունից ինժեկցիայի տարբեր մակարդակների և մագնիսական ինդուկցիայի տարբեր արժեքների դեպքում: Ցույց է տրված, որ մագնիսադիոդի իմպեդանսի ռեակտիվ բաղադրիչը իրենից ներկայացնում է բացասական ռեակտիվություն, որը համապատասխանում է ինդուկտիվությանը:

### SOME PROPERTIES OF MAGNETODIODES SENSITIVE TO THE DIRECTION OF MAGNETIC FIELD

G. A. EGIAZARYAN, G. A. MNATSAKANYAN, A. Kh. AVAGYAN

The dependence of the differential complex conductivity of magnetodiodes sensitive to the direction of a magnetic field on the frequency of an electric signal is investigated at different levels of injection and the induction values. It is shown that the reactive component of the impedance represents a negative capacity corresponding to the inductivity.