УДК 621.384

# ИМПЕДАНС ВАРИЗОННОЙ СТРУКТУРЫ С ДВОЙНОЙ ИНЖЕКЦИЕЙ ПРИ ВЫСОКОМ УРОВНЕ ИНЖЕКЦИИ

## К. Б. МАТЕВОСЯН

Ереванский государственный университет

(Поступила в редакцию 7 июня 1998г.)

Рассмотрено влияние малого гармонического сигнала на  $p^+nn^+$  диодную структуру в режиме высокого уровня инжекции, при наличии градиента ширины запрещенной зоны в n-базе. Получены графические зависимости реальной и мнимой частей импеданса и добротности от угла пролета для различных значений варизонности.

Рассмотрим реакцию на малый переменный сигнал  $p^*nn^+$  структуры, ширина запрещенной зоны n-базы которой меняется линейно с координатой x. Очевидно, что в такой варизонной структуре создается некоторое внутреннее дополнительное "квазиэлектрическое" поле  $E_0$ , действующее на свободные носители заряда [1]. Пусть ширина запрещенной зоны уменьшается вдоль положительных значений координаты x, а физическому эмиттерному  $p^*n$ -переходу соответствует начало координат. Как обычно, встроенное поле  $E_0$  в базе структуры зависит от ширины запрещенной зоны  $E_g(x)$  и равно

$$E_0 = -\frac{1}{e} \frac{\partial E_g(x)}{\partial x},\tag{1}$$

где е - заряд электрона.

Для решения поставленной задачи используем феноменологическую систему уравнений, описывающую в нестационарных условиях процессы генерации, рекомбинации и транспорта (переноса) носителей [2-5]:

$$J_{p} = eU_{p}P(E + E_{0}) - eD_{p}\frac{\partial P}{\partial x}, \qquad J_{n} = eU_{n}nE + eD_{n}\frac{\partial n}{\partial x}, \qquad (2)$$

$$J = J_n + J_p + \frac{\varepsilon \varepsilon_0}{4\pi} \cdot \frac{\partial (E + E_0)}{\partial t}, \tag{3}$$

$$n = p + N_D, (4)$$

$$\frac{\partial p}{\partial t} = -\frac{1}{e} \cdot \frac{\partial J_p}{\partial x} - \frac{p}{\tau_p}, \qquad \frac{np}{\partial t} = -\frac{1}{e} \cdot \frac{\partial J_n}{\partial x} - \frac{n}{\tau_n}. \tag{5}$$

Здесь E — напряженность электрического поля в базе,  $J_n$  и  $J_p$  — плотности электронной и дырочной составляющих тока, соответственно,  $U_n$  и  $U_p$  — подвижности электронов и дырок,  $D_n$ ,  $\tau_n$  и  $D_p$ ,  $\tau_p$  — коэффициенты диф-

фузии и времена жизни электронов и дырок, n и p – концентрации электронов и дырок в n-базе,  $\epsilon \epsilon_0$  – диэлектрическая постоянная,  $N_D$  – концентрация мелких доноров.

Рассмотрим задачу для случая высокого уровня инжекции  $2p >> mN_D$ , где m = b/(b+1),  $b = U_n / U_p$ . В этом приближении  $n \approx p$ . Пусть встроенное поле  $E_o$  не зависит от времени, т.е. ширина запрещенной зоны  $E_g$  изменяется линейно с координатой и кумуляция заряда отсутствует.

Конкретизируем закон изменения  $E_g$ . Пусть  $E_c(x) = E_{c0} - cx$ ,  $E_{\nu}(x) = E_{\nu 0} - \beta x$ ,  $E_{c0}$  и  $E_{\nu 0}$  — значения дна зоны проводимости и потолка валентной зоны в точке x=0 [6]. Тогда

$$E_g(x) = E_c(x) - E_v(x) = E_{co} - E_{vo} - (\alpha + \beta)x = E_{go} - (\alpha + \beta)x$$
. (6)

Здесь  $E_{\aleph^0}$  – ширина запрещенной зоны в точке x=0,  $\alpha$  и  $\beta$  характеризуют изменение дна зоны проводимости и потолка валентной зоны, соответственно.

При наличии малого переменного гармонического сигнала все величины, входящие в уравнения, кроме констант и  $E_0$ , можно представить в виде суммы постоянной и малой переменной составляющих:

$$\xi = \overline{\xi} + \widetilde{\xi}e^{i\alpha t}. \tag{7}$$

Тогда задача разделяется на стационарную и нестационарную. Уравнения, описывающие законы распределения стационарной и нестационарной составляющих концентрации дырок по базе, запишутся в виде

$$\frac{\partial^2 \overline{p}}{\partial x^2} - 2\gamma \frac{\partial \overline{p}}{\partial x} - \frac{\overline{p}}{L_p^2} = 0, \quad \frac{\partial^2 \widetilde{p}}{\partial x^2} - 2\gamma \frac{\partial \widetilde{p}}{\partial x} - \frac{\widetilde{p}}{L_{es}^2} = 0, \quad (8)$$

THE 
$$L_p^2=2mD_p\tau_p$$
,  $2\gamma=\frac{\alpha+\beta}{2kT}$ ,  $L_\omega^2=\frac{L_p^2}{1+i\omega\tau_p}$ .

Уравнения (8) решаются в совокупности с граничными условиями, характерными для идеально инжектирующих контактов  $J_n(0) = J_p(d) = 0$ . Учитывая уравнение квазинейтральности и вытекающие из него ограничения на частоту, удовлетворяющие неравенству

$$\frac{4\pi}{\varepsilon\varepsilon_0}(b+1)eU_p\overline{p}>>\omega, \qquad (9)$$

выражение для нестационарной составляющей напряженности электрического поля запишем в виде [1]

$$\widetilde{E} = \frac{\widetilde{J}}{eU_p(b+1)\overline{p}} - \frac{kT}{e} \frac{b-1}{b+1} \frac{d}{dx} \left( \frac{\widetilde{p}(x)}{\overline{p}(x)} \right) - \frac{\widetilde{J} \, \widetilde{p}}{eU_p(b+1)\overline{p}^2} \,. \tag{10}$$

Импеданс п-базы можно представить как

$$Z_T = \int_0^d \frac{\widetilde{E}}{\widetilde{J}} dx. \tag{11}$$

В соответствии с (10) импеданс n-базы состоит из трех частей:  $Z_T = Z_{T1} + Z_{T2} + Z_{T3}$ . Первое слагаемое есть сопротивление  $Z_{T1}$ , не зависящее от частоты, т.е. статическое сопротивление n-базы, модулированное инжекционным током J. Второе слагаемое обуславливает дембе-

ровскую составляющую сопротивления  $Z_{72}$ . Появление третьего слагаемого вызвано эффектом модуляции сопротивления базы, связанного с падением части переменного напряжения в базе при протекании постоянного тока. Активная часть  $Z_{73}$  представляет собой динамическое отрицательное сопротивление, а реактивная, как нетрудно убедиться, имеет индуктивную природу. Учитывая падение напряжения на переходах, получим

 $Z_{pn} = \frac{1}{\widetilde{J}} \frac{kT}{e} \frac{\widetilde{p}(0)}{\overline{p}(0)}, \qquad Z_{pn} = \frac{1}{\widetilde{J}} \frac{kT}{e} \frac{\widetilde{p}(d)}{\overline{p}(d)}. \tag{12}$ 

Запишем импеданс всей структуры в виде:

$$Z = Z_T + Z_{pn} + Z_{nn} = Z_{T1} + Z_{T3} + 2mZ_{pn} + \frac{2}{b+1}Z_{nn}.$$
 (13)

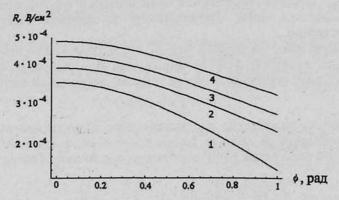


Рис.1. Зависимость реальной части импеданса R от угла пролета ф.

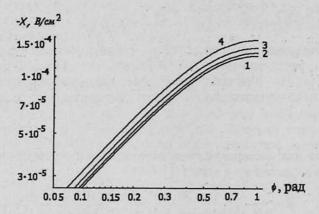


Рис.2. Зависимость мнимой части импеданса X от угла пролета  $\phi$ .

Нами получены соответствующие аналитические выражения для реальной R и мнимой X составляющих импеданса, анализ которых из-за их громоздкости проводился численно. На рис.1 и 2 представлены их графические зависимости от угла пролета  $\phi$ . Можно отметить что с увеличением варизонности значения ReZ и абсолютное значение ImZ последовательно увеличиваются для значений тока инжекции, удовлетворяющих условию высокого уровня инжекции. Отметим, что с увеличением степени варизонности добротность уменьшается (рис.3). Кривые

на рисунках сделаны при  $N_D=10^{14}{\rm cm}^{-3},\ \overline{J}=200\ {\rm A/cm}^2,\ 1-\Delta\ E_g=0\ {\rm эB},\ 2-\Delta\ E_g=0.26\ {\rm эB},\ 3-\Delta\ E_g=0.46\ {\rm эB},\ 4-\Delta\ E_g=0.74\ {\rm эB}.$ 

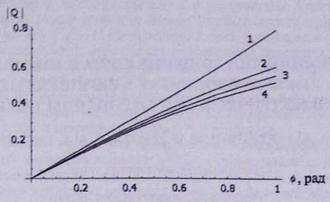


Рис.3. Зависимость абсолютного значения добротности от угла пролета ф.

Выражаю благодарность В.М.Арутюняну за постановку задачи и обсуждение результатов.

### ЛИТЕРАТУРА

- 1. Г.П.Пека. Варизонные полупроводники. Киев, Вища школа, 1989.
- В.М.Арутюнян. Генерационно-рекомбинационные эффекты и двойная инжекция в полупроводниках. Ереван, изд. АН Арм.ССР, 1977.
- Э.И.Адирович, П.М.Карагеоргий-Алкалаев, А.Ю.Лейдерман. Токи двойной инжекции в полупроводниках. М., изд. "Сов. радио", 1978.
- Д.А.Аронов, Р.Маматкулов, Я.П.Котов. Нестационарные токи двойной инжекции в полупроводниках. Ташкент, изд. ФАН, 1985.
- Ф.В.Гаспарян, З.Н.Адамян, В.М.Арутюнян. Кремниевые фотоприемники. Ереван, изд. ЕГУ, 1986.
- 6. В.М.Арупонян, К.Б.Матевосян. ДНАН Армении, 98, 52 (1998); V.Aroutiounian, M.Gulinian, K.Matevossian. Phys. Stat. Sol. (a), 165, 135 (1998).

# ԿՐԿՆԱԿԻ ԻՆԺԵԿՑԻԱՅՈՎ ՎԱՐԻՋՈՆԱՅԻՆ ԿԱՌՈՒՑՎԱԾՔԻ ԻՍՊԵԴԱՆՍԸ ԲԱՐՉՐ ԻՆԺԵԿՑԻԱՅԻ ՍԱԿԱՐԴԱԿԻ ԴԵՊՔՈՒՄ

#### 4. P. UURBYNUSUV

Ինժեկցիայի բարձր մակարդակի ռեժիմում դիտարկված է թույլ հարմոնիկ ազդանշանի ազդեցությունը  $p^+m^+$  դիտդային կառուցվածքի վրա, n-բազայի արգելված գոտու գրադիենտի առկայության դեպքում։ Վարիզոնուցյան տարբեր արժեքների դեպքում ներկայացված են իմպեդանսի իրական և կեղծ մասերի, ինչպես նաև բարորակության ֆունկցիոնալ կախվածությունները թռիչքի անկյունից։

# IMPEDANCE OF GRADED BAND-GAP STRUCTURE WITH DOUBLE INJECTION IN HIGH INJECTION LEVEL

#### K. B. MATEVOSSIAN

Influence of small harmonic signal on  $p^+m^+$  diode structure with a graded band-gap in the case of high injection level is investigated. The graphic dependences of real, imaginary parts of impedance and quality on the transit angle are presented.