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

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

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]:

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

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

$$n = p + N_p, \tag{4}$$

$$\frac{\partial p}{\partial t} = -\frac{1}{e} \cdot \frac{\partial J_p}{\partial x} - \frac{p}{\tau_n}, \qquad \frac{np}{\partial t} = -\frac{1}{e} \cdot \frac{\partial J_n}{\partial x} - \frac{n}{\tau_n}.$$
 (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 , τ_n и D_p , τ_p – коэффициенты диф-

фузии и времена жизни электронов и дырок, *n* и *p* – концентрации электронов и дырок в *n*-базе, *se*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 $E_c(x) = E_{c0} - \alpha x$, $E_v(x) = E_{v0} - \beta x$, E_{c0} и E_{v0} – 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_{g0} - ширина запрещенной зоны в точке x = 0, α и β характеризуют изменение дна зоны проводимости и потолка валентной зоны, соответственно.

При наличии малого переменного гармонического сигнала все всличины, входящие в уравнения, кроме констант и *E*₀, можно представить в виде суммы постоянной и малой переменной составляющих:

$$\xi = \overline{\xi} + \widetilde{\xi} e^{i\omega t}.$$
 (7)

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

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

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

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

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

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

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

Импеданс п-базы можно представить как

$$Z_T = \int_{0}^{d} \frac{\widetilde{E}}{\widetilde{J}} dx.$$
 (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 демберовскую составляющую сопротивления Z₇₂. Появление третьего слагаемого вызвано эффектом модуляции сопротивления базы, связанного с падением части переменного напряжения в базе при протекании постоянного тока. Активная часть Z₇₃ представляет собой динамическое отрицательное сопротивление, а реактивная, как нетрудно убедиться, имеет индуктивную природу. Учитывая падение напряжения на переходах, получим

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





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 ϕ . 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 слеланы при $N_D = 10^{14}$ см⁻³, $\vec{J} = 200$ A/см², $1-\Delta E_g = 0$ эВ, $2-\Delta E_g = 0.26$ эВ, $3-\Delta E_g = 0.46$ зВ, $4-\Delta E_g = 0.74$ зВ.



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.
- В.М.Арутюнян, 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 ԻՄՊԵԴԱՆՍԸ ԲԱՐՉՐ ԻՆԺԵԿՑԻԱՅԻ ՍԱԿԱՐԴԱԿԻ ԴԵՊՔՈՒՄ

Կ.Բ. ՄԱԹԵՎՈՍՅԱՆ

Ինժեկցիայի բարձր մակարդակի ռեժիմում դիտարկված է թույլ հարմոնիկ ազդանշանի ազդեցությունը *p*⁺*nn*⁺ դիոդային 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^+nn^+ 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.