

**В. И. КРАВЧЕНКО**, д-р техн. наук, профессор, НТУ «ХПИ»;  
**И. В. ЯКОВЕНКО**, д-р физ.-мат. наук, профессор, НТУ «ХПИ»

## **МЕХАНИЗМЫ ОТКАЗОВ ПОЛУПРОВОДНИКОВЫХ КОМПЛЕКТУЮЩИХ ЭЛЕКТРОРАДИОИЗДЕЛИЙ ПРИ ВОЗДЕЙСТВИИ ВНЕШНЕГО ЭЛЕКТРОМАГНИТНОГО ИЗЛУЧЕНИЯ**

Показано, что влияние импульсного электромагнитного излучения сопровождается возникновением токов в проводящих элементах изделий и возникновением их внутренних полей. Определены механизмы генерации колебаний полупроводниковых структур, обусловленных их взаимодействием с потоками заряженных частиц в условиях воздействия стороннего электромагнитного излучения.

**Ключевые слова:** электромагнитное излучение, полупроводниковые структуры.

**Введение.** Настоящая работа в определенной степени компенсирует существующий пробел в области исследований обратимых отказов, характеризующих временной потерей работоспособности изделия. В ней рассматривается влияние токов, наведенных внешним электромагнитным излучением на волновые процессы приводящие к искажению рабочих характеристик полупроводниковых структур, используемых в современной СВЧ – электронике.

Используемые модели механизмов возникновения отказов полупроводниковых приборов в большинстве своем, относятся к области необратимых отказов, характеризующихся полной потерей работоспособности и обычно ограничены рамками теории цепей с распределенными параметрами. Этот подход позволяет оценить критерии работоспособности в целом (например оценить критическую энергию, характеризующую тепловой пробой), но не дают возможность определять искажения рабочих характеристик при сохранении работоспособности изделия в целом.

**1. Основные результаты.** Объектом исследования является (полупроводниковая сверхрешетка). Предполагается, что в результате воздействия ЭМИ, в периодической структуре, состоящей из полупроводниковых пластин, возникает поток заряженных частиц, который теряет часть своей энергии на возбуждение ее собственных электромагнитных колебаний. В настоящей работе исследуются механизмы взаимодействия наведенных внешним излучением токов с электростатическими колебаниями подобных структур. Получены выражения для собственных частот и механизмы их генерации, т.е. определены энергетические потери наведенных ЭМИ токов на их возбуждение

Для описания электромагнитных свойств структуры состоящей из плазменных слоев, в пренебрежении эффектами запаздывания, воспользуемся следующей системой уравнений:

$$\begin{aligned} \frac{\partial n}{\partial t} + \operatorname{div}(n_0 \vec{v} + \vec{v}_0 n); \quad m \left( \frac{\partial \vec{v}}{\partial t} + v_0 \frac{\partial \vec{v}}{\partial z} \right) &= e \vec{E}; \\ \operatorname{rot} \vec{E} &= 0; \\ \frac{\partial N}{\partial t} + \operatorname{div}[N_0(z) \vec{u}] &= 0; \quad m \frac{\partial \vec{u}}{\partial t} = e \vec{E}; \\ \operatorname{div}[\varepsilon_0(z) \vec{E}] &= 4\pi e(N + n). \end{aligned} \quad (1)$$

Определим спектр и затухание (нарастание) электромагнитных колебаний такой системы. Выбираем систему отсчета таким образом, чтобы оси  $X$ ,  $Y$  были направлены параллельно, а ось  $Z$  – перпендикулярно границе раздела. Заметим, что потери энергии заряженной частицы при прохождении через слой диэлектрик впервые рассматривались в работе [3].

Здесь  $n(r,t)$ ,  $N(r,t)$ ,  $v(r,t)$ ,  $u(r,t)$  – возмущенные концентрации и скорости электронов пучка и неподвижной плазмы,  $\varepsilon_0(z)$ ;  $N_0(z)$  – являются периодическими функциями, принимающими в пределах  $d = d_1 + d_2$  значения  $\varepsilon_{01;02}$ ;  $N_{01;02}$ . Индексы «1» и «2» будут означать принадлежность величин, входящих в уравнения (4.66) к слоям с индексами толщины «1» и «2». В дальнейшем необходимо ввести скалярный потенциал  $\varphi(r,t)$ ; ( $\vec{E} = -\vec{\nabla} \varphi$ ).

На границе слоев выполняются условия непрерывности потенциалов и полных токов  $J_i$  (смещения и проводимости):

$$\begin{aligned} J_i &= \frac{\varepsilon_{0i}}{4\pi} \frac{\partial E_{iz}}{\partial t} + e(N_{0i} u_{iz} + n_0 v_{iz} + v_0 n_i); \quad i = 1, 2. \\ \varphi_1(0) &= \varphi_2(0); \\ J_1(0) &= J_2(0). \end{aligned} \quad (2)$$

В связи с образованием в структуре волн пространственного заряда (ВПЗ), обусловленных движущимся потоком частиц, возникает необходимость в дополнительных граничных условиях. В качестве таковых используются непрерывности потоков заряженных частиц и их импульсов. Используя свойство трансляционной симметрии  $\varphi(z+d) = \varphi(z) \exp(ikd)$  ( $k$  – произвольный волновой вектор), можно представить граничные условия на плоскостях, разделяющих слои, следующим образом:

$$\begin{aligned} \varphi_1(d_1) &= \varphi_2(-d_2) \exp(ikd); \quad J_1(d_1) = J_2(d_2) \exp(ikd); \\ n_1(d_1) &= n_2(-d_2) \exp(ikd); \quad v_{1z}(d_1) = v_{2z}(-d_2) \exp(ikd). \end{aligned} \quad (3)$$

Представляя зависимость всех переменных величин от координат и времени экспоненциальной, легко получить решение уравнений в каждом слое. С помощью граничных условий (2)–(3) можно исключить неопределенные константы и получить дисперсионное уравнение, связывающее между собой

частоту, волновые векторы –  $\omega$ ,  $q_{x,y}$ ,  $k$  и параметры среды.

$$\cos\left(\frac{\omega}{v_0} - k\right)d = \cos \lambda_1 d_1 \cos \lambda_2 d_2 - \frac{\lambda_1^2 + \lambda_2^2}{2\lambda_1 \lambda_2} \sin \lambda_1 d_1 \sin \lambda_2 d_2. \quad (4)$$

Здесь  $\varepsilon_i = \varepsilon_{0i} - \frac{\omega_{0i}^2}{\omega^2}$ ;  $\lambda_i = \frac{\omega_0}{v_0 \sqrt{\varepsilon_i}}$ ;  $\omega_{0i}$ ;  $\omega_0$  – ленгмюровские частоты

электронов неподвижной плазм.

Это уравнение впервые было получено в работе [4], где была показана возможность возникновения неустойчивых состояний. При этом в [4] не принимались во внимание связанные с частотной дисперсией диэлектрической проницаемости собственные колебания, существующие в структуре в отсутствие пучка.

В случае малой плотности пучка  $\lambda_1 d_1 \ll 1$ ;  $\lambda_2 d_2 \ll 1$  уравнение (4) преобразуется к виду:

$$\cos\left(\frac{\omega}{v_0} - k\right)d = 1 - \frac{\omega_0^2 d^2}{2v_0^2 \varepsilon_{zz}}, \quad (5)$$

где  $\varepsilon_{zz}(\omega) = d\varepsilon_1 \varepsilon_2 / (d_1 \varepsilon_2 + d_2 \varepsilon_1)$  – компонента тензора диэлектрической проницаемости мелкодисперсной среды. Закон дисперсии колебаний имеет тот же вид, что и в однородной среде, диэлектрическая проницаемость которой равна  $\varepsilon_{zz}(\omega, d_1, d_2)$ . Из выражения (5) в приближении малой плотности пучка полагая получим:

$$\Delta\omega^2 = \frac{\omega_0^2}{\varepsilon_{zz}(\omega = kv_0)}; \quad \Delta\omega \ll kv_0. \quad (6)$$

В этом случае возникают колебания с частотой, определяемой временем пролета  $\tau$  частицей пространственного периода структуры  $\tau = \frac{d}{v_0}$ . Целое число  $l$  равно отношению времени пролета к периоду колебаний.

Колебания становятся неустойчивыми при условии  $\varepsilon_{zz} < 0$  ( $\Delta\omega^2 < 0$ ), то есть диэлектрическая проницаемость хотя бы одного из слоев должна обладать частотной дисперсией и быть отрицательной.

Инкремент неустойчивости равен:

$$\text{Im } \Delta\omega = \frac{\sqrt{3}}{2} \left( \frac{\omega_0^2 \omega_{p1} d_1}{2\varepsilon_{01} d} \right)^{\frac{1}{3}},$$

где  $\omega_{p1} = \frac{\omega_{01}}{\sqrt{\varepsilon_{01}}}$ .

Если  $\omega = kv_0$  то мы имеем неустойчивость в условиях черенковского ре-

зонанса с инкрементом, который в  $\left(\frac{d_1}{d_2}\right)^{\frac{1}{3}}$  раз меньше чем в однородной

плазме. В случае  $\omega_p = \frac{2\pi\nu_0}{d}l$  неустойчивость связана с черенковским пара-

метрическим излучением заряженной частицы [3]. Из выражения (6) следует, что неустойчивость возникает также при условии когда  $\varepsilon_{zz}$  является комплексной величиной и  $\text{Re } \varepsilon_{zz} > 0$ .

Исследуемая модель взаимодействия наведенных токов и колебаний в полупроводниковых комплектоующих ЭРИ является достаточно универсальной и позволяет рассмотреть ряд частных случаев наиболее интересных при проведении экспериментов по определению критериев стойкости в области обратимых отказов.

**Выводы.** Количественные оценки показывают, что величина энергии излучения лежит в пределах чувствительности современных приемников излучения субмиллиметрового диапазона ( $\frac{\partial W}{\partial t} \approx 10^{-11}$  Вт).

Предложена модель взаимодействия наведенных внешним ЭМИ токов с электростатическими колебаниями полупроводниковой сверхрешетки, основанная на реализации резонансного (черенковского) взаимодействия движущихся зарядов и электромагнитных колебаний в условиях, когда совпадают фазовая скорость волны и скорость заряженной частицы.

Получены расчетные соотношения, связывающие величину инкремента неустойчивостей с величиной наведенных токов и параметрами МДП – структур: концентрацией свободных носителей, диэлектрической проницаемостью, размерами структуры.

**Список литературы:** 1. *Мырова Л.О., Чепиженко А.З.* Обеспечение стойкости аппаратуры связи к ионизирующим электромагнитным излучениям. – М.: Радио и связь, 1988. – 235 с. 2. *Михайлов М.И., Разумов Л.Д., Соколов С.А.* Электромагнитные влияния на сооружения связи. – М.: Радио и связь, 1979. – 225 с. 3. *Стил М., Вюраль Б.* Взаимодействие волн в плазме твердого тела. – М.: Атомиздат, 1973. – 312 с. 4. *Белецкий Н.Н., Светличный В.М., Халамейда Д.Д., Яковенко В.М.* Электромагнитные явления СВЧ – диапазона в неоднородных полупроводниковых структурах. – К.: Наукова думка, 1991.– 216 с. 5. *Зи С.* Физика полупроводниковых приборов. – М.: Мир, 1984. – 456 с.

**Bibliography (transliterated):** 1. *Myrova L.O., Chepizhenko A.Z.* Obespechenie stojkosti apparatury svyazi k ioniziruyuschim elektromagnitnym izlucheniya. – M.: Radio i svyaz', 1988. – 235. 2. *Mihajlov M.I., Razumov L.D., Sokolov S.A.* Elektromagnitnye vliyaniya na sooruzheniya svyazi. – M.: Radio i svyaz', 1979. – 225. 3. *Stil M., Vyural' B.* Vzaimodejstvie voln v plazme tverdogo tela. – M.: Atomizdat, 1973. – 312. 4. *Beleckij N.N., Svetlichnyj V.M., Halamejda D.D., Yakovenko V.M.* Elektromagnitnye yavleniya SVCh – diapazona v neodnorodnyh poluprovodnikovyh strukturah. – K.: Naukova dumka, 1991.– 216. 5. *Zi S.* Fizika poluprovodnikovyh priborov. – M.: Mir, 1984. – 456.

*Надійшла (received) 11.03.2014*

УДК 621.318

**Механізми відмов напівпровідникових комплектуючих електрорадіовиробів при дії зовнішнього електромагнітного випромінювання / В. І. Кравченко, І. В. Яковенко // Вісник НТУ «ХП». Серія: Техніка та електрофізика високих напруг. – Х.: НТУ «ХП», 2014. – № 21 (1064). – С. 84-87. – Бібліогр.: 5 назв. – ISSN 2079-0740.**

Встановлено, що дія імпульсного електромагнітного випромінювання на електрорадіовироби супроводжується виникненням струмів у провідних елементах виробів та утворенням їх внутрішніх полів. Розроблено методи визначення механізмів генерації власних коливань напівпровідникових структур, обумовлених їх взаємодією з потоками заряджених частинок в умовах дії стороннього електромагнітного випромінювання.

**Ключові слова:** електромагнітне випромінювання, напівпровідникові структури

УДК 621.318

**Механизмы отказов полупроводниковых комплекующих электрорадиоизделий при воздействии внешнего электромагнитного излучения / В. И. Кравченко, И. В. Яковенко // Вісник НТУ «ХП». Серія: Техніка та електрофізика високих напруг. – Х.: НТУ «ХП», 2014. – № 21 (1064). – С. 84-87. – Бібліогр.: 5 назв. – ISSN 2079-0740.**

Показано, что влияние импульсного электромагнитного излучения сопровождается возникновением токов в проводящих элементах изделий и возникновением их внутренних полей. Определены механизмы генерации колебаний полупроводниковых структур, обусловленных их взаимодействием с потоками заряженных частиц в условиях воздействия стороннего электромагнитного излучения.

**Ключевые слова:** электромагнитное излучение, полупроводниковые структуры.

**Failure mechanism of semiconductor components under the influence of external electrical radio electromagnetic radiation / V. I. Kravchenko, I. V. Yakovenko // Bulletin of NTU "KhPI". Series: Technique and electrophysics of high voltage. – Kharkiv : NTU "KhPI", 2014. – № 21 (1064). – P. 84-87. – Bibliogr.: 5. – ISSN 2079-0740.**

The influence of pulsed electromagnetic radiation on electric radio apparatus is often accompanied by currents arcing on inner current – conducting elements as well as by the distortion of their internal fields. The power losses of the flow of charged particles caused by such an interaction due to excitation of surface polaritons in the semiconductor superstructure have been determined.

**Key words:** electromagnetic radiation, semiconductor superstructure.