

УДК 621.318

**В.И. КРАВЧЕНКО, И.В. ЯКОВЕНКО****ВЛИЯНИЕ ЭЛЕКТРОМАГНИТНОГО ИЗЛУЧЕНИЯ НА ВОЛНОВОДНЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ПОЛУПРОВОДНИКОВЫХ КОМПЛЕКТУЮЩИХ РАДИОИЗДЕЛИЙ**

Определены механизмы возникновения неустойчивостей собственных колебаний полупроводниковых сверхрешеток, обусловленных их взаимодействием с потоками заряженных частиц в условиях влияния внешнего электромагнитного излучения. Показано, что влияние импульсного электромагнитного излучения сопровождается возникновением токов в проводящих элементах изделий и возникновением их внутренних полей. Разработан новый механизм появления поверхностных электронных состояний на неровной поверхности проводящих твердых тел. Исследовано влияние неоднородных свойств поверхностей проводящих твердых тел в излучающих структурах на спектральные характеристики переходного и черенковского излучения. Разработана теория бесстолкновительного затухания поверхностных поляритонов в квантовом и классическом приближениях.

**Ключевые слова:** электромагнитные поля, колебания, плазма, полупроводник, сверхрешетка, бесстолкновительное затухание, кинетическая и гидродинамическая неустойчивости.

**В.И. КРАВЧЕНКО, И.В. ЯКОВЕНКО****ВПЛИВ ЕЛЕКТРОМАГНІТНОГО ВИПРОМІНЮВАННЯ НА ХВИЛЕВОДНІ ХАРАКТЕРИСТИКИ НАПІВПРОВІДНИКОВИХ КОМПЛЕКТУЮЧИХ РАДІОВИРОБІВ**

Визначено механізми виникнення нестійкостей власних коливань напівпровідникових надграт, обумовлених їх взаємодією з потоками заряджених частинок в умовах дії стороннього електромагнітного випромінювання. Показано, що дія імпульсного електромагнітного випромінювання на електрорадіовироби часто супроводжується виникненням струмів у провідних елементах виробів та утворенням їх внутрішніх полів. Запропонований механізм появи поверхневих електронних станів на нерівних межах провідних твердих середовищ. Досліджено вплив неоднорідних властивостей поверхні у випромінюючих структурах на спектральні характеристики перехідного та черенківського випромінювання. Побудовано теорію беззіткнувального згасання поверхневих поляритонів у квантовому та класичному наближеннях.

**Ключові слова:** електромагнітні поля, коливання, плазма, напівпровідник, надгратка, беззіткнувальне згасання, кінетична та гідродинамічна нестійкості.

**V.I. KRAVCHENKO, I.V. YAKOVENKO****INFLUENCE OF ELECTROMAGNETIC RADIATION ON WAVEGUIDE CHARACTERISTICS OF SEMICONDUCTOR COMPONENT RADIO ARTICLES**

Mechanisms of initiation of instabilities of natural oscillations of semiconductor superlattices caused by their interaction with flows of charged particles in conditions of influence of electromagnetic radiation are determined. It is shown that influence of pulsed electromagnetic radiation is accompanied by initiation of currents in conducting elements of the articles and initiation of their internal fields. A new mechanism of formation of surface electronic states at uneven surface of conducting solids is developed. Influence of nonuniform properties of surfaces of conducting solids in radiating structures on spectral characteristics of transient and Cherenkov radiation is investigated. A theory of collisionless damping of surface polaritons in quantum and classical approximations is developed.

**Key words:** electromagnetic fields, oscillations, plasma, semiconductor, superlattice, collisionless damping, kinetic and hydrodynamic instability

**Введение**

Моделирование механизмов возникновения необратимых отказов, возникающих вследствие взаимодействия наведенных ЭМИ токов и напряжений с процессами, характеризующими функциональное назначение изделий, обычно проводится в рамках теории цепей с распределенными параметрами. Этот подход позволяет оценить критерии работоспособности в целом (например, оценить критическую энергию, характеризующую тепловой пробой).

Большинство имеющихся теоретических и экспериментальных результатов исследований влияния электромагнитного излучения (ЭМИ) на радиоизделия относятся к области необратимых отказов. (как из-

вестно, все типы отказов, возникающие в электрорадиоизделиях, принято разделять на обратимые и необратимые [1, 2]). Необратимые отказы характеризуются полной утратой работоспособности изделия. Они наступают в случае, когда изменение рабочих характеристик аппаратуры превышает допустимые пределы (при воздействии внешнего ЭМИ необратимые отказы обычно возникают вследствие теплового пробоя комплектов).

В тоже время, для обратимых отказов, характеризуемых временной утратой работоспособности, использование теории цепей не позволяет определять искажения выходных характеристик радиоизделий. Поэтому, большинство вопросов, связанных с опреде-

лением механизмов обратимых отказов, связанных с влиянием наведенных токов на работоспособность изделия в области обратимых отказов остаются открытыми.

Настоящая работа в определенной степени компенсирует существующий пробел в этой области исследований обратимых отказов. В ней исследуется взаимодействие потоков заряженных частиц, наведенных ЭМИ, с волновыми процессами в полупроводниковых структурах, используемых в современной СВЧ – электронике.

### 1. Основные результаты

Предполагается, что в результате воздействия ЭМИ, в периодической структуре, состоящей из полупроводниковых пластин (полупроводниковая сверхрешетка), возникает поток заряженных частиц, который теряет часть своей энергии на возбуждение ее собственных электромагнитных колебаний

В статье исследуются дисперсионные характеристики данной структуры и механизмы взаимодействия потока заряженных частиц с электростатическими колебаниями. Получены выражения для собственных частот и определены энергетические потери наведенных ЭМИ токов на их возбуждение в миллиметровом и субмиллиметровом диапазонах электромагнитных волн.

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 слоистый диэлектрик впервые рассматривались в работе [3].

Пусть моноэнергетический нейтральный поток заряженных частиц с плотностью  $n_0$  проходит с постоянной скоростью  $v_0$  через периодическую структуру (период  $q$ ), состоящую из чередующихся плазменных слоев  $d_1, d_2$  и различающихся диэлектрическими постоянными концентрациями электронов проводимости  $N_{01}, N_{02}$ .

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

$$\begin{aligned} \varphi_1(0) &= \varphi_2(0); \\ J_1(0) &= J_2(0). \end{aligned} \quad (1)$$

где  $J_i = \frac{\varepsilon_{0i}}{4\pi} \frac{\partial E_{iz}}{\partial t} + e(N_{0i}u_{iz} + n_0v_{iz} + v_0n_i)$   $i = 1, 2$ .

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

$$\begin{aligned} \operatorname{rot} \vec{E} &= 0 \quad ; \operatorname{div}[\varepsilon_0(z)\vec{E}] = 4\pi e(N + n); \\ \frac{\partial N}{\partial t} + \operatorname{div}[N_0(z)\vec{u}] &= 0; \quad m \frac{\partial \vec{u}}{\partial t} = e\vec{E}; \\ \frac{\partial n}{\partial t} + \operatorname{div}(n_0\vec{v} + \vec{v}_0n) &; \quad m \left( \frac{\partial \vec{v}}{\partial t} + v_0 \frac{\partial \vec{v}}{\partial z} \right) = e\vec{E}. \end{aligned} \quad (2)$$

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  $\varphi(r, t); (\vec{E} = -\vec{\nabla} \varphi)$ .

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. Эти условия имеют вид:

$$\begin{aligned} n_1(0) &= n_2(0); \\ v_{1z}(0) &= v_{2z}(0). \end{aligned} \quad (3)$$

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:

$$\begin{aligned} \varphi_1(d_1) &= \varphi_2(-d_2) \exp(ikd); \quad J_1(d_1) = J_2(d_2) \exp(ikd); \\ n_1(d_1) &= n_2(-d_2) \exp(ikd); \quad v_{1z}(d_1) = v_{2z}(-d_2) \exp(ikd). \end{aligned} \quad (4)$$

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 –  $\omega, q_x, q_y, k$  и параметры среды.

Рассмотрим одномерный случай:  $q_x, q_y = 0$ . Решение системы уравнений (1) в  $i$ -м слое имеет вид:

$$\begin{aligned} \varphi_i(z) &= A_i z + B_i + \frac{4\pi e^2 v_0}{\varepsilon_i} \left[ \frac{C_i \exp(i\lambda_i z)}{(\omega + v_0 \lambda_i)^2} + \right. \\ &+ \left. \frac{F_i \exp(-i\lambda_i z)}{(\omega - v_0 \lambda_i)^2} \right] \exp(i \frac{\omega}{v_0} z); \\ E_i &= -A_i - \frac{4\pi i e v_0}{\varepsilon_i} \left[ \frac{C_i \exp(i\lambda_i z)}{\omega + v_0 \lambda_i} + \right. \\ &+ \left. \frac{F_i \exp(-i\lambda_i z)}{\omega - v_0 \lambda_i} \right] \exp(i \frac{\omega}{v_0} z); \end{aligned} \quad (5)$$

$$n_i = (C_i \exp(i\lambda_i z) + F_i \exp(-i\lambda_i z)) \exp(i \frac{\omega}{v_0} z);$$

$$\begin{aligned} v_i &= -\frac{4\pi e^2}{m\lambda_i \varepsilon_i} \left[ \frac{C_i \exp(i\lambda_i z)}{\omega + v_0 \lambda_i} - \right. \\ &- \left. \frac{F_i \exp(-i\lambda_i z)}{\omega - v_0 \lambda_i} \right] \exp(i \frac{\omega}{v_0} z) + \frac{eA_i}{im\omega}. \end{aligned}$$

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

гмюровские частоты электронов неподвижной плазмы и пучка  $A, B, C, F$  – произвольные постоянные. Видно, что потенциал содержит слагаемые различного рода. Первое и второе представляют собой решение уравне-

ния Лапласа  $\frac{\partial^2 \varphi}{\partial z^2} = 0$ , третье и четвертое – потенциалы, создаваемые ВПЗ. Легко убедиться, что граничные условия допускают решения  $A_i = 0$ , так как при этом  $J_i(z)$  тождественно обращается в нуль, концентрация и скорость частиц зависят от констант  $C, F$ , а граничные условия для потенциалов (3) и (4) позволяют определить  $B_1, B_2$  через  $C, F$ . При этом из граничных условий получим дисперсионное уравнение:

$$\cos\left(\frac{\omega}{v_0} - k\right)d = \cos \lambda_1 d_1 \cos \lambda_2 d_2 - \frac{\lambda_1^2 + \lambda_2^2}{2\lambda_1 \lambda_2} \sin \lambda_1 d_1 \sin \lambda_2 d_2. \quad (6)$$

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 (6) преобразуется к виду:

$$\cos\left(\frac{\omega}{v_0} - k\right)d = 1 - \frac{\omega_0^2 d^2}{2v_0^2 \varepsilon_{zz}}, \quad (7)$$

где  $\varepsilon_{zz}(\omega) = d\varepsilon_1 \varepsilon_2 / (d_1 \varepsilon_2 + d_2 \varepsilon_1)$  – компонента тензора диэлектрической проницаемости мелкодисперсной среды.

В случае слабой пространственной дисперсии:  $\frac{\omega d}{v_0} \ll 1$ ;  $kd \ll 1$  из выражения (7) получим:

$$\left(\frac{\omega}{v_0} - k\right)^2 = \frac{\omega_0^2}{v_0^2 \varepsilon_{zz}}. \quad (8)$$

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 (8) в приближении малой плотности пучка полагая получим:

$$\Delta\omega^2 = \frac{\omega_0^2}{\varepsilon_{zz}(\omega = kv_0)}; \quad \Delta\omega \ll kv_0. \quad (9)$$

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

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

случае  $\omega_p = \frac{2\pi v_0 l}{d}$  неустойчивость связана с черенковским параметрическим излучением заряженной частицы.

Из выражения (8) 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 комплекующих ЭРИ является достаточно универсальной и позволяет рассмотреть ряд частных случаев наиболее интересных при проведении экспериментов по определению критериев стойкости в области обратимых отказов.

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.

Пусть  $\varepsilon_2 > 0$ ;  $\varepsilon_1 < 0$ . Тогда из формул (8), (9) следует:

$$\Delta\omega^3 = \frac{\omega_0^2 \omega_{p1} d_1}{2\varepsilon_{01} d}. \quad (10)$$

### Выводы

Приведенные количественные оценки инкремента неустойчивостей показывают, что величина энергии излучения лежит в пределах чувствительности современных приемников излучения субмиллиметрового диапазона

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. Белецкий Н.Н. Электромагнитные явления СВЧ – диапазона в неоднородных полупроводниковых структурах / Н.Н. Белецкий, В.М. Светличный, Д.Д. Халамейда, В.М. Яковенко. – К.: Наукова думка, 1991. – 216 с.
2. Зи С. Физика полупроводниковых приборов / С. Зи. – М.: Мир, 1984. – 456 с.
3. Михайлов М.И. Электромагнитные влияния на сооружение связи / М.И. Михайлов, Л.Д. Разумов, С.А. Соколов. – М.: Радио и связь, 1979. – 225 с.
4. Стил М. Взаимодействие волн в плазме твердого тела / М. Стил, Б. Вюраль. – М.: Атомиздат, 1973. – 312 с.
5. Мырова Л.О. Обеспечение стойкости аппаратуры связи к ионизирующим электромагнитным излучениям / Л.О. Мырова, А.З. Чепиженко. – М.: Радио и связь, 1988. – 235 с.
6. Кравченко В.И. Влияние стороннего электромагнитного излучения на волноводные характеристики полупроводниковых комплекующих электрорадиоизделий / В.И. Кравченко, В.И. Яковенко, И.В. Яковенко, Ф.В. Лосев // Вестник НТУ «ХПИ». – 2009. – № 11. – С. 62-69.

7. Кравченко В.И. Генерация электромагнитных колебаний полупроводниковой структуры в условиях стороннего электромагнитного воздействия / В.И. Кравченко, И.В. Яковенко, Ф.В. Лосев // Вестник НТУ «ХПИ». – 2012. – № 21. – С. 161-169.

8. Кравченко В.И. Влияние потока заряженных частиц. Наведенного внешним электромагнитным излучением, на волноводные характеристики полупроводниковых комплектов электрорадиоизделий / В.И. Кравченко, И.В. Яковенко, Ф.В. Лосев // Вестник НТУ «ХПИ». – 2013. – № 27. – С. 83-89.

9. Кравченко В.И. Влияние стороннего электромагнитного излучения на волноводные характеристики полупроводниковой сверхрешетки / В.И. Кравченко, И.В. Яковенко, Ф.В. Лосев // Вестник НТУ «ХПИ». – 2013. – № 27. – С. 89-96.

10. Кравченко В.И. Затухание поверхностных колебаний полупроводниковых структур электрорадиоизделий в условиях воздействия стороннего электромагнитного излучения / В.И. Кравченко, И.В. Яковенко, Ф.В. Лосев // Вестник НТУ «ХПИ». – 2013. – № 27. – С. 96-103.

11. Кравченко В.И. Кинетические механизмы взаимодействия поверхностных колебаний с электронами проводимости полупроводниковых структур в условиях воздействия стороннего электромагнитного излучения / В.И. Кравченко, И.В. Яковенко, Ф.В. Лосев // Вестник НТУ «ХПИ». – 2013. – № 27. – С.103-111.

#### References (transliterated):

1. Beleckij N.N., Svetlichnyj V.M., Halamejda D.D., Jakovenko V.M. Jeletromagnitnye javlenija SVCh – diapazona v neodnorodnyh poluprovodnikovyh strukturah [Electromagnetic phenomena of the microwave range in inhomogeneous semiconductor structures]. Kyiv: Naukova dumka. 1991. 216 p.
2. Zi C. Fizika poluprovodnikovyh priborov [Physics of semiconductor devices]. Moscow: Mir. 1984. 456 p.
3. Mihajlov M.I., Razumov L.D., Sokolov S.A. Jeletromagnitnye vlijanija na sooruzhenija svjazi. Moscow: Radio i svjaz'. 1979. 225 p.
4. Stil M., Vjural' B. Vzaimodejstvie voln v plazme tverdogo tela [Electromagnetic influences on communications structures]. Moscow: Atomizdat, 1973. 312 p.
5. Myrova L.O., Chepizhenko A.Z. Obespechenie stojkosti apparatury svjazi k ionizirujushhim jeletromagnitnym izluchenijam [Ensuring the durability of communication equipment to ionizing

electromagnetic radiation]. Moscow: Radio i svjaz', 1988. 235 p.

6. Kravchenko V.I., Jakovenko V.I., Jakovenko I.V., Losev F.V. Vlijanie storonnego jeletromagnitnogo izluchenija na volnovodnye karakteristiki poluprovodnikovyh komplektujushhh jelektroradioizdelij [Influence of external electromagnetic radiation on the waveguide characteristics of semiconductor components of electronic products]. Vestnik NTU "KhPI". 2009. No 11. P. 62- 69.

7. Kravchenko V.I., Jakovenko I.V., Losev F.V. Generacija jeletromagnitnyh kolebanij poluprovodnikovoj struktury v uslovijah storonnego jeletromagnitnogo vozdejstvija [Generation of electromagnetic oscillations of a semiconductor structure under conditions of external electromagnetic influence]. Vestnik NTU "KhPI". 2012. No 21. P. 161-169.

8. Kravchenko V.I., Jakovenko I.V., Losev F.V. Vlijanie potoka zarjzhennyh chastic. Navedennogo vnesnim jeletromagnitnym izlucheniem, na volnovodnye karakteristiki poluprovodnikovyh komplektujushhh jelektroradioizdelij [Influence of the flow of charged particles. Induced by external electromagnetic radiation, on the waveguide characteristics of semiconductor components of electronic products]. Vestnik NTU "KhPI". 2013. No 27. P. 83-89.

9. Kravchenko V.I., Jakovenko I.V., Losev F.V. Vlijanie storonnego jeletromagnitnogo izluchenija na volnovodnye karakteristiki poluprovodnikovoj sverhreshetki [The influence of external electromagnetic radiation on the waveguide characteristics of a semiconductor superlattice]. Vestnik NTU "KhPI". 2013. No 27. P. 89-96.

10. Kravchenko V.I., Jakovenko I.V., Losev F.V. Zatuhanie poverhnostnyh kolebanij poluprovodnikovyh stuktur jelektroradioizdelij v uslovijah vozdejstvija storonnego jeletromagnitnogo izluchenija [Attenuation of surface oscillations of semiconductor structures of electronic products under conditions of exposure to external electromagnetic radiation]. Vestnik NTU "KhPI". 2013. No 27. P. 96-103.

11. Kravchenko V.I., Jakovenko I.V., Losev F.V. Kineticheskie mehanizmy vzaimodejstvija poverhnostnyh kolebanij s jeletronami provodimosti poluprovodnikovyh stuktur v uslovijah vozdejstvija storonnego jeletromagnitnogo izluchenija [Kinetic mechanisms of interaction of surface oscillations with conduction electrons of semiconductor structures under the influence of external electromagnetic radiation]. Vestnik NTU "KhPI". 2013. No 27. P. 103-111.

Поступила (received) 12.03.2018

#### Відомості про авторів / Сведения об авторах / About the Authors

**Кравченко Володимир Іванович (Кравченко Владимир Иванович, Kravchenko Vladimir Ivanovich)** – доктор технічних наук, професор, головний науковий співробітник НДПКІ «Молнія» НТУ «ХПІ»; тел. (057) 707-6079; e-mail: nii90@email.ua

**Яковенко Ігор Володимирович (Яковенко Игорь Владимирович, Yakovenko Igor Vladimirovich)** – доктор фізико-математичних наук, професор, професор кафедри «Системи інформації» НТУ «ХПІ»; тел. (057) 707 6618; e-mail: yakovenko60IV@ukr.net