

УДК 621.318

В.И. КРАВЧЕНКО, А.А СЕРКОВ, В.С. БРЕСЛАВЕЦ, И.В ЯКОВЕНКО**АНАЛИЗ ВЛИЯНИЯ ВНЕШНИХ ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫХ ПОЛЕЙ НА РАБОТОСПОСОБНОСТЬ ПОЛУПРОВОДНИКОВЫХ ПРИБОРОВ**

Проведен анализ влияния внешних электромагнитных полей на работоспособность полупроводниковых приборов. 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, сверхрешетки, бесстолкновительное угасание, кинетическая и гидродинамическая неустойчивости, генерирование, черенковское и переходное излучение, геликоны, заряженные частицы, поверхностные волны.

Введение. Степень влияния внешних электромагнитных полей на работоспособность ЭРИ неодинакова. К наиболее чувствительным относятся полупроводниковые приборы (ППП) и интегральные микросхемы (ИМС) [1]. Основные отказы этих изделий связаны с электрическими (влияющими на величину и распределение токов в структуре приборов) и тепловыми (определяющими повышение температуры отдельных участков этой структуры) [2]. Поэтому наиболее существенное влияние на работоспособность этих изделий оказывают импульсные напряжения наведенные ЭМИ на электрически связанных с ними соединительных линиях.

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 известно, 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 электромагнитного необратимые отказы обычно возникают вследствие теплового пробоя комплектующих).

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 определением механизмов обратимых отказов, связанных с влиянием наведенных токов на работоспособность изделия в области обратимых отказов остаются от-

крытыми.

Анализ причин отказов и выхода из строя технических средств (ТС) показал [2], что непосредственное воздействие электромагнитных полей с уровнями напряженности электрического поля до 100 кВ/м и магнитных полей до 600 А/м, как правило, не приводит к структурным повреждениям материалов изделий электронной техники и тем самым не вызывает остаточных изменений (деградации) их параметров. Таким образом, данный уровень параметров электромагнитных полей ограничивает область необратимых отказов.

Цель работы. В статье исследуются основные характеристики, определяющие степень влияния импульсных электромагнитных полей на работоспособность полупроводниковых приборов комплектующих электрорадиоизделия.

Постановка задачи. Следует отметить, что воздействие на простейшие типовые схемы радио- и электротехнического оборудования ТС, содержащих полупроводниковые приборы и микросхемы, электрических полей с напряженностью порядка 20 кВ/м и магнитных – 100 А/м уже сопровождается кратковременными (обратимыми) нарушениями их работоспособности [1, 2].

Импульсная электрическая прочность является основной характеристикой, определяющей предел работоспособности ППП (область **необратимых отказов**) при воздействии наведенных импульсных токов и напряжений, вызванных ЭМИ [8]. Для ППП данный параметр определяется как наибольшее значение обратного напряжения и соответствующего ему обратного тока, предшествующее перекрытию р-п перехода. Как правило, данный параметр определяет тот количественный предел эксплуатационных характеристик ППП, после которого наблюдается деградация прибора. При этом основной причиной отказа полупроводниковых приборов является **вторичный тепловой пробой**, который наблюдается во всех типах полупроводниковых приборов [7].

© В.И. Кравченко, А.А Серков, В.С. Бреславец, И.В Яковенко, 2015

Вторичный тепловой пробой р-п-переходов ППП при прямом смещении является результатом тепловой нестабильности в локализованных областях полупроводниковой структуры, которая возникает при неравномерности распределения тока по структуре. При обратном смещении р-п-переходов возникновение вторичного пробоя является результатом появления лавинного тока при высоких напряжениях и его связывают с локальным перегревом в области р-п-перехода.

Наиболее критичными к воздействию импульсных токов и напряжений являются обратно смещенные р-п-переходы приборов. Это обусловлено очень маленькими размерами активных областей и большой тепловой постоянной времени для материалов [7,8]. Так как большое количество энергии рассеивается в окрестностях активных областей р-п-переходов и тепловая постоянная времени является очень большой по сравнению с длительностью импульса ЭМИ, тепло под действием ЭМИ выделяется на малой площади, а температура в этой области становится довольно высокой вплоть до температуры плавления материалов. Это приводит к появлению между переходом и смежными областями возникает большой температурный градиент, то есть повреждениям, вызванным плавлением материалов, и тепловому пробую.

Стойкость полупроводниковых приборов к действию импульсных перегрузок можно характеризовать также пороговой энергией, выделенной в приборе [8].

Пороговая энергия повреждения – энергия при выделении которой в приборе за время действия импульса перенапряжения хотя бы один из параметров прибора выходит за нормы, установленные НТД. Для импульсных напряжений с длительностью импульса $\tau_n \leq 0,1$ мкс эта энергия постоянна и ее называют **критической энергией повреждения** [8].

Решение задачи. Большинство используемых на настоящее время методик оценок критериев работоспособности полупроводниковых приборов в условиях воздействия стороннего электромагнитного излучения [4,7] определяет критическую энергию $W_{кр}$, вызывающую отказ изделия следующим соотношением:

$$W_{кр} = U_d I_d \Delta t_{\min}, \quad (1)$$

где $U_d I_d$ – соответственно напряжение и ток лавинного пробоя, Δt_{\min} – минимальное время рассеивания наведенной ЭМИ мощности (развития пробоя).

Критическая энергия импульса, вызывающая отказ ППП не зависит от временных параметров воздействующего импульса перенапряжения, а определяется физико-конструктивными параметрами р-п-переходов и удельными сопротивлениями их высокоомных областей [8].

Универсальность пороговой энергии повреждения ППП, как параметра, характеризующего уровень их электромагнитной стойкости, заключается в том, что эти интегральные характеристики содержат как амплитудные, так и временные параметры воздействующих напряжений, и жестко не приведены к определенному виду источника их возникновения (грозовые разряды, разряды статического электричества,

высоковольтные ЛЭП и т.п.).

В связи с большим многообразием механизмов отказов полупроводниковых приборов определение точного значения энергии (мощности) повреждения изделия в настоящее время еще представляет определенные трудности. Но существуют ряд методик приближенных оценок уровней мощности повреждения изделия. К ним относится работа [10], где экспериментально для диодов и транзисторов была получена зависимость удельной пробойной мощности тока, проходящего через р-п-переход, от длительности импульса

$$P_{кр}/S = f(\tau),$$

где $P_{кр}$ – мощность тока, проходящего через поперечное сечение (S) р-п-перехода, при которой происходит катастрофический отказ диода (транзистора); τ – длительность прямоугольного импульса. Соответствующая зависимость широко используется в литературе по данной проблеме, носит название зависимости (кривой) Вунша – Белла и представлена на рис. 1. На рис. 1 в логарифмическом масштабе приведены теоретические и экспериментальные зависимости удельной пробойной мощности от длительности приложенного прямоугольного импульса [10].

Для аналитического описания экспериментальных данных авторами была получена полуэмпирическая формула зависимости удельной пороговой мощности (P/S , кВт/см²) отказов р-п-переходов от длительности импульса (t , мкс):

$$P/S = K_d \cdot t^{-1/2}, \quad (2)$$

где K_d – коэффициент деградации, который определялся на основании экспериментальных данных.

В работе [10] приводятся экспериментальные и теоретические (рассчитанные на основании полуэмпирических формул) результаты исследований стойкости диодов при подаче на них напряжений, отличных по форме от прямоугольных импульсов. Приведенные экспериментальные данные в целом удовлетворяли критерию Вунша-Белла.

Механизм обратимых отказов. Рассмотрим взаимодействие потоков заряженных частиц, наведенных ЭМИ, с волновыми процессами в слоистых полупроводниковых структурах, используемых в современной СВЧ – электронике [11 – 12].

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} .

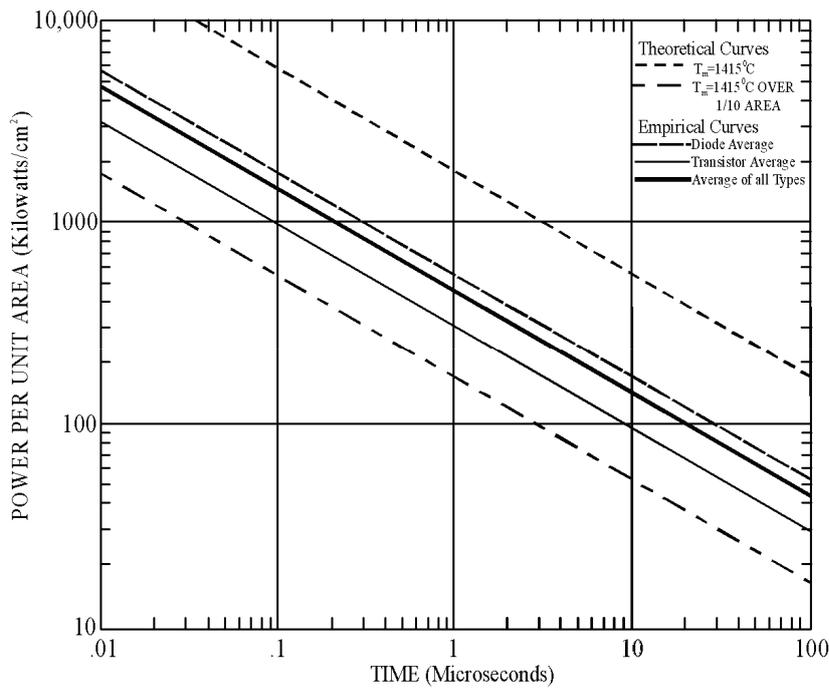


Рисунок 1 – Зависимость удельной пороговой мощности от длительности импульса (зависимость Вунша-Белла) [31]

На границе слоев выполняются условия непрерывности потенциалов и полных токов

Для описания электромагнитных свойств структуры состоящей из плазменных слоев, в пренебрежении эффектами запаздывания, воспользуемся системой уравнений Максвелла и гидродинамики. Представляя зависимость всех переменных величин от координат и времени экспоненциальной, легко получить решение уравнений в каждом слое. С помощью граничных условий можно исключить неопределенные константы и получить дисперсионное уравнение, связывающее между собой частоту, волновые векторы – ω , q_x , y , k и параметры среды.

$$\cos\left(\frac{\omega}{v_0} - k\right)d = \cos\lambda_1 d_1 \cos\lambda_2 d_2 - \frac{\lambda_1^2 + \lambda_2^2}{2\lambda_1\lambda_2} \times \sin\lambda_1 d_1 \sin\lambda_2 d_2. \quad (3)$$

Это уравнение впервые было получено в работе [4], где была показана возможность возникновения неустойчивых состояний. При этом 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 (3) преобразуется к виду:

$$\cos\left(\frac{\omega}{v_0} - k\right)d = 1 - \frac{\omega_0^2 d^2}{2v_0^2 \epsilon_{zz}}, \quad (4)$$

где

$\epsilon_{zz}(\omega) = d\epsilon_1\epsilon_2 / (d_1\epsilon_2 + d_2\epsilon_1)$ – компонента тензора диэлектрической проницаемости мелкодисперсной среды.

В случае слабой пространственной дисперсии:

$$\frac{\omega d}{v_0} \ll 1; \quad kd \ll 1$$

получим:

$$\left(\frac{\omega}{v_0} - k\right)^2 = \frac{\omega_0^2}{v_0^2 \epsilon_{zz}}. \quad (5)$$

Закон дисперсии колебаний имеет тот же вид, что и в однородной среде, диэлектрическая проницаемость которой равна $\epsilon_{zz}(\omega, d_1, d_2)$. В приближении малой плотности пучка получим:

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

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

Инкремент неустойчивости равен:

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

где

$$\omega_{p1} = \frac{\omega_{01}}{\sqrt{\epsilon_{01}}}. \quad (7)$$

Если $\omega = kv_0$ то мы имеем неустойчивость в условиях черенковского резонанса с инкрементом, который в $(d_1/d_2)^{\frac{1}{3}}$ раз меньше чем в однородной плазме.

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

Таким образом зная величину инкремента неустойчивости мы можем оценивать такую характеристику обратимых отказов как величину энергии излучения собственных колебаний слоистой структуры в зависимости от параметров наведенного внешним

ЗМИ тока (концентрации носителей, их дрейфовой скорости и размеров структуры).

Выводы. 1. Приведены предельно допустимые эксплуатационные параметры отечественных полупроводниковых приборов, определяющих электромагнитную стойкость. Там же сформулированы практические рекомендации по обеспечению и повышению электромагнитной стойкости полупроводниковых приборов элементной базы ТС:

– энергия повреждения ППП лежит в пределах от 10^{-4} до 10^{-7} Дж;

– менее стойкими оказываются высокочастотные импульсные и маломощные ППП;

– тепловой пробой ППП как правило возникает при запираии транзисторов, работающих в ключевом режиме при больших напряжениях и токах, не превышающих предельных значений для этих приборов;

– явление смыкания (прокола) базы чаще всего возникает у транзисторов, получаемых методом сплавления, у транзисторов с неоднородной базой это явления практически отсутствует;

– основной причиной отклонения параметров логических микросхем от норм ТУ является нарушение функций их диодов и транзисторов

2. Предложена модель возникновения обратимых отказов полупроводниковых приборов, обусловленных взаимодействием наведенных внешним ЭМИ токов с электростатическими колебаниями полупроводниковой сверхрешетки. Модель базируется 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 слоистых структур: концентрацией свободных носителей, диэлектрической проницаемостью, размерами структуры.

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

Список литературы: 1. Мырова Л.О. Обеспечение стойкости аппаратуры связи к ионизирующим электромагнитным излучениям / Л.О.Мырова, А.З.Чепиженко. – М.: Радио и связь, 1988. – 235 с. 2. Михайлов М.И. Электромагнитные влияния на сооружения связи / М.И.Михайлов, Л.Д.Разумов, С.А.Соколов. – М.: Радио и связь, 1979. – 225 с. 3. Стиль М. Взаимодействие волн в плазме твердого тела / М.Стил, Б.Вюраль. – М.: Атомиздат – 1973. – 312 с. 4. 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. 5. Зи С. Физика полупроводниковых приборов / С.Зи. – М.: Мир, 1984.

– 456 с. 6. Кравченко В.И. Влияние стороннего электромагнитного излучения на волноводные характеристики полупроводниковых комплектирующих 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. Возбуждение электромагнитных колебаний в 2-D электронных структурах токами, наведенными внешним излучением / В.И.Кравченко, И.В.Яковенко, Ф.В.Лосев // Вестник НТУ «ХПИ». – 2012. – № 21. – С. 154–161. 8. 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. 9. Кравченко В.И. Влияние потока заряженных частиц. Наведенного внешним электромагнитным излучением, на волноводные характеристики полупроводниковых комплектирующих 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.

Bibliography (transliterated): 1. Myrova L.O., Chepizhenko A.Z. Obespechenie stojkosti apparatury svyazi k ionizirujushhim jelektromaginitnym izluchenijam. Moscow: Radio i svjaz', 1988. 235. Print. 2. Mihajlov M.I., Razumov L.D., Sokolov S.A. Jelektromaginitnye vlijanja na sooruzhenija svyazi. Moscow: Radio i svjaz', 1979. 225. Print. 3. Stil M., Vjural' B. Vzaimodejstvie voln v plazme tverdogo tela. Moscow: Atomizdat, 1973. 312. Print. 4. Beleckij N.N., Svetlichnyj V.M., Halamejda D.D., Jakovenko V.M. Jelektromaginitnye javlenija SVCh – diapazona v neodnorodnyh poluprovodnikovyh strukturah. – Kyviv: Naukova dumka, 1991. 216. Print. 5. Zi S. Fizika poluprovodnikovyh priborov. Moscow: Mir, 1984. 456. Print. 6. Kravchenko V.I., Jakovenko V.I., Jakovenko I.V., Losev F.V. Vlijanie storonnego jelektromaginitnogo izluchenija na volnovodnye harakteristiki poluprovodnikovovyh komplektujushhh jelektroradioizdelij. Vestnik NTU "KhPI". 2009. No 11. 62–69. Print. 7. Kravchenko V.I., Jakovenko V.I., Losev F.V. Vozbuzhdenie jelektromaginitnyh kolebanij v 2-D jelektronnnyh strukturah tokami, navedennymi vneshnim izlucheniem. Vestnik NTU "KhPI". 2012. No 21. 154–161. Print. 8. Kravchenko V.I., Jakovenko I.V., Losev F.V. Generacija jelektromaginitnyh kolebanij poluprovodnikovoj struktury v uslovijah storonnego jelektromaginitnogo vozdejstvia. Vestnik NTU "KhPI". 2012. No 21. 161–169. Print. 9. Kravchenko V.I., Jakovenko I.V., Losev F.V. Vlijanie potoka zarjzhennyh chastic. Navedennogo vneshnim jelektromaginitnym izlucheniem, na volnovodnye harakteristiki poluprovodnikovovyh komplektujushhh jelektroradioizdelij. Vestnik NTU "KhPI". 2013. No 27. 83–89. Print. 9. Kravchenko V.I., Jakovenko I.V., Losev F.V. Vlijanie storonnego jelektromaginitnogo izluchenija na volnovodnye harakteristiki poluprovodnikovoj sverhreshetki. Vestnik NTU "KhPI". 2013. No 27. 89–96. Print. 10. Kravchenko V.I., Jakovenko I.V., Losev F.V. Zatuhanie poverhnostnyh kolebanij poluprovodnikovyh stuktur jelektroradioizdelij v uslovijah vozdejstvia storonnego jelektromaginitnogo izluchenija. Vestnik NTU "KhPI". 2013. No 27. 96–103. Print. 11. Kravchenko V.I., Jakovenko I.V., Losev F.V. Kineticheskie mehanizmy vzaimodejstvia poverhnostnyh kolebanij s jelektronami provodimosti poluprovodnikovyh struktur v uslovijah vozdejstvia storonnego jelektromaginitnogo izluchenija. Vestnik NTU "KhPI". 2013. No 27. 103–111. Print.

Поступила (received) 06.10.2015

Відомості про авторів / Сведения об авторах / About the Authors

Кравченко Владимир Иванович – доктор технических наук, профессор, директор НИПКИ «Молния» НТУ ХПИ, тел. (057) 707 61 33, e-mail: kravchenkomolnia@mail.ru

Kravchenko Vladimir Ivanovich – Doctor of Technical Sciences, professor, director of NIPKI «Molnija» NTU "KhPI". tel. (057) 707 61 33, e-mail: kravchenkomolnia@mail.ru

Серков Александр Анатольевич – доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой Системы информации НТУ «ХПИ». тел. (057) 707 61 33, e-mail: saa@kpi.kharkov.ua

Serkov Aleksandr Anatolievich – Doctor of Technical Sciences, professor, head of the Department Information System of NTU "KhPI". tel. (057) 707 66 18, e-mail: saa@kpi.kharkov.ua

Бреславец Виталий Сергеевич – кандидат технических наук, доцент, профессор кафедры Системы информации НТУ «ХПИ». тел. (057) 707 61 39, e-mail: bres123@mail.ru

Breslavets Vitaliy Sergeevich – Candidate of Technical Sciences, docent, professor of the Department Information System of NTU "KhPI". tel. (057) 707 61 39, e-mail: bres123@mail.ru

Яковенко Игорь Владимирович – доктор физико-математических наук, профессор, профессор кафедры «Системы информации» НТУ «ХПИ». тел. (057) 707 66 18, e-mail: yakovenko60IV@mail.ru

Yakovenko Igor Vladimirovich – Doctor of Physical and Mathematical Sciences, professor, professor of Department Information System NTU "KhPI". Tel. (057) 707 66 18, e-mail: yakovenko60IV@mail.ru

УДК 621.318

В.И. КРАВЧЕНКО, А.А СЕРКОВ, В.С. БРЕСЛАВЕЦ, И.В ЯКОВЕНКО

ВЛИЯНИЕ НЕРОВНОСТЕЙ ПОВЕРХНОСТИ ТВЕРДЫХ ТЕЛ НА СПЕКТР ЭЛЕКТРОНОВ И ПЛАЗМЕННЫХ КОЛЕБАНИЙ

Определен механизм возникновения поверхностных электронных состояний на периодически неровной границе проводящих твердых тел. 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, сверхрешетки, бесстолкновительное угасание, кинетическая и гидродинамическая неустойчивости, генерирование, черенковское и переходное излучение, геликоны, заряженные частицы, поверхностные волны.

Введение. Исследованиям поверхностных электронных состояний посвящено большое количество работ, в которых основное внимание уделялось исследованию электронных состояний, возникающих на поверхности кристалла и обусловленных ограниченностью кристаллической решетки или, другими словами, обрывом периодического потенциала [1]. При этом, в зависимости от выбора физической модели различают состояния Тамма, возникающие вследствие изменения хода потенциала на границе кристалл – вакуум, и состояние Шокли, обусловленное обрывом связей атомов на границе.

Однако упомянутые выше две модели не исчерпывают всех задач о поверхностных состояниях. Вызывает интерес иная ситуация, когда частица движется в поле постоянного, а не периодического потенциала, но ее движение ограничено в одном направлении неровной стенкой, представляющей собой бесконечно высокий потенциальный барьер.

Известно, что если граница гладкая, то поверхностные состояния не возникают. В случае же неровной поверхности раздела сред вопрос о квантовых поверхностных состояниях изучен недостаточно полно. В настоящей работе исследовались возможности появления поверхностных электронных состояний, обусловленных наличием малых периодических неровностей границы твердого тела [7–9].

Постановка и решение проблемы. Рассмотрим электронные состояния в полупространстве $y > y_0(x)$, ограниченном потенциальным барьером $U(x,y)$ [7]

$$\begin{aligned} U(x,y) &= \infty & y \leq y_0(x); \\ U(x,y) &= 0 & y > y_0(x). \end{aligned} \quad (1)$$

где $y_0(x)$ – функция, описывающая форму границы раздела сред. В данном параграфе ограничимся рассмотрением границы – бесконечно высокого потенциального барьера, неровности которой зависят от одной координаты x . Собственные волновые функции $\Psi(x,y,z)$ и собственные значения энергии электрона E определяются решением уравнения Шредингера:

$$\Delta\Psi + \frac{2m}{\hbar^2}[E - U(x,y)]\Psi = 0. \quad (2)$$

и граничными условиями на поверхности $y = y_0(x)$ и бесконечности. На поверхности $y = y_0(x)$ граничные условия бывают двух типов [8]:

$$\Psi(y_0(x)) = 0. \quad (3)$$

$$\vec{n}\vec{\nabla}\Psi|_{y=y_0(x)} = 0; \quad \vec{\nabla} = \vec{i}\frac{\partial}{\partial x} + \vec{j}\frac{\partial}{\partial y} + \vec{k}\frac{\partial}{\partial z}, \quad (4)$$

где \vec{n} – вектор нормали к поверхности $y = y_0(x)$: