

nyh kompleksov [The study of thermal conditions of high-voltage pulse capacitors for dawnhall electric discharges complexes]. Visnyk NTU «KhPI» Tem. vyp.: Tekhnika i elektrofizyka vysokoykh naprug. [Bulletin of the National Technical

University "KhPI" Special Issue: Technique and Electrophysics of High Voltage]. Kharkiv, NTU "KhPI" Publ., 2012, no. 52, pp. 71-76.

Поступила (received) 24.10.2018

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

**Гулько Віктор Іванович (Гулько Виктор Иванович, Gup'ko Viktor Ivanovych)** – зав. сектором, Інститут імпульсних процесів та технологій НАН України, м. Миколаїв; тел.: (0512) 58-71-36; e-mail: dphc@iipt.com.ua.

**Дмитрішин Олексій Ярославович (Дмитришин Алексей Ярославович, Dmitrishin Aleksey Yaroslavovych)** – молодший науковий співробітник, Інститут імпульсних процесів та технологій НАН України, м. Миколаїв; тел.: (0512) 58-71-36; e-mail: dphc@iipt.com.ua.

**Топоров Сергій Олександрович (Топоров Сергей Александрович, Toporov Sergey Olegovich)** – провідний інженер, Інститут імпульсних процесів та технологій НАН України, м. Миколаїв; тел.: (0512) 58-71-36; e-mail: dphc@iipt.com.ua.

**Танасова Олена Дмитрівна (Танасова Елена Дмитриевна, Tanasova Elena Dmitrievna)** – провідний інженер-конструктор, Інститут імпульсних процесів та технологій НАН України, м. Миколаїв; тел.: (0512) 58-71-36; e-mail: dphc@iipt.com.ua.

**Фещук Тетяна Анатоліївна (Фещук Татьяна Анатольевна, Feshchuk Tatiana Anatolievna)** – провідний інженер-технолог, Інститут імпульсних процесів та технологій НАН України, м. Миколаїв; тел.: (0512) 58-71-36; e-mail: dphc@iipt.com.ua.

УДК 621.318

**В.И. КРАВЧЕНКО, И.В. ЯКОВЕНКО, Л.В. ВАВРИВ**

**ПОВЕРХНОСТНЫЕ СОСТОЯНИЯ ЭЛЕКТРОНОВ НА НЕОДНОРОДНОЙ ПОВЕРХНОСТИ ТВЕРДЫХ ТЕЛ**

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 поля. Показано, что влияние импульсного электромагнитного излучения сопровождается возникновением токов в проводящих элементах изделий и возникновением их внутренних полей магнитного излучения. 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 неустойчивость генерация излучение заряженные частицы поверхностные волны.

**В.І. КРАВЧЕНКО, І.В. ЯКОВЕНКО, Л.В. ВАВРИВ**

**ПОВЕРХНЕВІ СТАНИ ЕЛЕКТРОНІВ НА НЕОДНОРІДНІЙ ПОВЕРХНІ ТВЕРДИХ ТІЛ**

Запропоновано механізм появи поверхневих електронних станів на нерівних межах провідних твердих середовищ. 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. 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, нестійкість, генерування, випромінювання, заряджені частинки, поверхневі хвилі.

**V. KRAVCHENKO, I. YAKOVENKO, L. VAVRIV**

**SURFACE CONDITIONS OF ELECTRONS ON INHOMOGENEOUS SURFACE OF SOLID STATES**

© В.И. Кравченко, И.В. Яковенко, Л.В. Ваврив, 2018

The mechanism of the appearance of surface electronic states on a periodically irregular boundary of conducting solids is determined. The mechanisms of occurrence of the instability of the eigen oscillations of semiconductor superlattices due to their interaction with the flows of charged particles under the conditions of the influence of the external electromagnetic field are determined. It is shown that the influence of pulsed electromagnetic radiation is accompanied by the appearance of currents in conducting elements of products and the appearance of their internal fields. magnetic radiation. A new mechanism for the appearance of surface electronic states on the uneven surface of conducting solids has been developed. The influence of inhomogeneous properties of surfaces of conducting solids in emitting structures on the spectral characteristics of the transition and Cherenkov radiation is investigated. The theory of collision-free damping of surface polaritons in quantum and classical approximations is developed.

**Keywords:** electromagnetic fields, oscillations, plasma, semiconductor, instability, generation, radiation, charged particles, surface waves.

### 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].

### Основные результаты

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  $y = y_0(x)$ :

$$n_x = -\frac{\frac{\partial y_0}{\partial x}}{\sqrt{\left(\frac{\partial y_0}{\partial x}\right)^2 + 1}}; \quad n_y = -\frac{1}{\sqrt{\left(\frac{\partial y_0}{\partial x}\right)^2 + 1}}; \quad n_z = 0. \quad (5)$$

Условия (3) – (4) означают, соответственно, равенство нулю плотности потока частиц и плотности частиц.

В случае периодически неровной границы

$$y_0(x) = \zeta_0 \cos(Gx); \quad d = \frac{2\pi}{G} -$$

волновая функция  $\Psi(x,y,z)$  может быть представлена следующим образом:

$$\Psi(x,y,z) = \sum_{n=-\infty}^{\infty} A_n \exp[i(k_x + nG)x + ik_y y + ik_z z], \quad (6)$$

где  $\vec{k}(k_x, k_y, k_z)$  – волновой вектор электрона. Из уравнения Шредингера (2) следует соотношение между  $E$  и  $\vec{k}$ :

$$k_{yn}^2 = \frac{2mE}{\hbar^2} - (k_x + Gn)^2 - k_z^2, \quad (7)$$

а граничное условие (4) задает связь между величинами  $k_x$ ,  $k_{yn}$  и  $k_z$ , определяя тем самым закон дисперсии  $E = E(\vec{k})$ .

Для решения уравнения Шредингера с условием (4) воспользуемся теорией возмущения, считая, что амплитуда неровностей мала по сравнению с ее периодом ( $\zeta_0 k_x \ll 1$ ). Это позволяет ограничиться рассмотрением гармоник  $n = -1, 0, 1$  из которых амплитуда гармоники  $A_0$  является максимальной.

Подставляя в уравнение (4) выражение (6) получим следующее дисперсионное соотношение:

$$k_{y0} = -\frac{1}{4}\zeta_0^2 \left( \frac{[k_{y-1}^2 - G(k_x - G)](k_{y0}^2 + Gk_x)}{k_{y-1}} + \frac{[k_{y1}^2 + G(k_x + G)](k_{y0}^2 - Gk_x)}{k_{y1}} \right). \quad (8)$$

Решение (8) определяется путем последовательных приближений по малому параметру

$$\zeta_0: \quad k_{y0} = k_{y0}^{(0)} + \delta k_{y0} + \dots$$

Если  $\zeta_0 = 0$ , то  $k_{y0}^{(0)} = 0$  и

$$k_x^2 = \frac{2mE}{\hbar^2} - k_z^2. \quad (9)$$

Следующее приближение дает:

$$\delta k_{y0} = -\frac{1}{4}(\zeta_0 k_x G)^2 \left( \frac{1}{k_{y1}} + \frac{1}{k_{y-1}} \right); \quad (10)$$

$$\delta E = \frac{\hbar^2 \delta k_{y0}^2}{2m}; \quad k_{y\pm 1}^2 = -G(G \pm 2k_x). \quad (11)$$

В случае, когда  $k_x \ll q$  из уравнения (10) получим:

$$\delta k_{y0} = \frac{1}{2}i(\zeta_0 k_x)^2 G; \quad k_{y1} = k_{y-1} = iG. \quad (12)$$

Из уравнения (12) видно, что длина пространственной локализации волновой функции электрона  $R = \frac{i}{\delta k_{y0}}$  уменьшается с увеличением волнового вектора  $k_x$ .

Наиболее эффективно периодические неоднородности поверхности влияют на электронные состояния в условиях резонанса, когда совпадают волновые векторы соседних гармоник, распространяющихся в противоположных направлениях оси  $x$ , (например,  $k_{y0} = k_{y-1}$ ). В этом случае  $k_x = \frac{1}{2}G \equiv k_r$  и из уравнения (10) получим:

$$\delta k_{y0}^2 = -\zeta_0^2 k_r^2; \quad (14)$$

$$E = \frac{\hbar^2}{2m} [k_z^2 + k_r^2 (1 - \zeta_0^2 k_r^2)]. \quad (15)$$

Уравнение (14) имеет следующие решения:

$$\text{Re } \delta k_{y0} = 0; \quad \text{Im } \delta k_{y0} = \zeta_0 k_r^2. \quad (16)$$

которые соответствуют предельно локализованному поверхностному состоянию. Таким образом, электронные поверхностные состояния существуют в области  $k_x \leq \frac{G}{2} - (\text{Im } k_{y0\pm 1} > 0)$ .

В области  $k_x > \frac{G}{2}$  часто поверхностные состояния не возникают. При этом  $\delta k_{y0}$  и  $E$  принимают комплексные значения. В области  $k_x \gg G$  уравнение (8) имеет решение:

$$\delta k_{y0} = \frac{(-1+i)\zeta_0^2 (k_x G)^{3/2}}{\sqrt{2}}; \quad (17)$$

$$\delta E = -i \frac{\hbar^2 \zeta_0^4 (k_x G)^3}{2m}. \quad (18)$$

Это означает, что квантовые состояния являются квазистационарными, т.е.  $\Psi \sim e^{-t/\tau}$  со временем жизни

$$\tau = \frac{2m}{\hbar^2 \zeta_0^4 (k_x G)^3}. \quad (19)$$

## Выводы

1. Полученные выше результаты указывают на то, что неровности границы раздела двух сред, приводят к возникновению поверхностных электронных состояний, волновая функция которых экспоненциально убывает с расстоянием при удалении от границы.

2. Экспериментальное наблюдение указанных

эффектов может быть осуществлено, например, на границе полупроводник-диэлектрик. Граница может иметь естественную шероховатость или периодическую структуру в виде дислокаций несоответствия, или же можно создать искусственный периодический рельеф. Согласно полученным результатам, электроны будут локализоваться вблизи границы в слое толщиной  $R$ , поскольку  $\Psi \sim e^{-y/R}$ . Если взять период поверхности  $a = 10^{-5}$  см, величине, доступной при литографическом способе изготовления структуры, а соотношение между амплитудой неровностей  $\zeta_0$  и длиной волны ( $\lambda = 1/k$ )  $\zeta_0 k \approx 0,1$ , то электроны будут локализоваться в слое толщиной  $R = 10^{-4}$  см в резонансном случае, а в длинноволновом пределе в слое, толщиной на порядок больше.

3. Следует отметить, что в предельных случаях – длинноволновом и коротковолновом –  $R$  имеет одинаковые порядки величин как для периодической поверхности, так и для случайной. В этих предельных случаях свойства поверхности слабо проявляются на длине волны. Наиболее эффективное взаимодействие возникает, когда длина волны де Бройля электрона сравнима с характерным размером неоднородности и выполняется условие отражения Брэгга.

4. Определен спектр собственных электромагнитных колебаний неоднородного плазменного слоя, возникающего на границе проводящих твердых тел, малые неровности которых имеют периодический (статистический) характер. Показано, что наличие поверхностных электронных состояний приводит к появлению поверхностных закон дисперсии которых отличается от закона дисперсии поляритонов, распространяющихся вдоль гладкой поверхности плазмы. Неоднородность плазмы вблизи поверхности приводит к появлению пространственной дисперсии поверхностных электростатических колебаний, их фазовая скорость меньше фазовой скорости поляритонов, распространяющихся вдоль гладкой поверхности полупроводниковой плазмы.

## 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 союжения 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». Сборник научных трудов. Серия: Техника и электрофизика высоких напряжений. – 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». Сборник научных трудов. Серия: Техника и электрофизика высоких напряжений. – 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». Сборник научных трудов. Серия: Техника и электрофизика высоких напряжений. – 2012. – № 21. – С. 161-169.

9. 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». Сборник научных трудов. Серия: Техника и электрофизика высоких напряжений. – 2013. – № 27. – С. 83-89.

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». Сборник научных трудов. Серия: Техника и электрофизика высоких напряжений. – 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». Сборник научных трудов. Серия: Техника и электрофизика высоких напряжений. – 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 izlu-

chenijam [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 storonnogo jeletromagnitnogo izluchenija na volnovodnye harakteristiki poluprovodnikovyh komplektujushhij jeletroradioizdelij [Influence of external electromagnetic radiation on the waveguide characteristics of semiconductor components of electronic products]. Vestnik NTU "KhPI". Sbornik nauchnyh trudov. Seriya: Tehnika i elektrofizika vysokih napryazhenij. 2009. No 11. P. 62-69.

7. Kravchenko V.I., Jakovenko I.V., Losev F.V. Vozbuzhdenie jeletromagnitnyh kolebanij v 2-D jeletronnyh strukturah tokami, navedennymi vneshnim izlucheniem. Vestnik NTU "KhPI". Sbornik nauchnyh trudov. Seriya: Tehnika i elektrofizika vysokih napryazhenij. 2012. № 21. P. 154-161.

8. Kravchenko V.I., Jakovenko I.V., Losev F.V. Generacija jeletromagnitnyh kolebanij poluprovodnikovoj struktury v uslovijah storonnogo jeletromagnitnogo vozdejstvija [Generation of electromagnetic oscillations of a semiconductor structure under conditions of external electromagnetic influence]. Vestnik NTU "KhPI". Sbornik nauchnyh trudov. Seriya: Tehnika i elektrofizika vysokih napryazhenij. 2012. No 21. P. 161-169.

9. Kravchenko V.I., Jakovenko I.V., Losev F.V. Vlijanie potoka zarjzhenykh chastic. Navedennogo vneshnim jeletromagnitnym izlucheniem, na volnovodnye harakteristiki poluprovodnikovyh komplektujushhij jeletroradioizdelij [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". Sbornik nauchnyh trudov. Seriya: Tehnika i elektrofizika vysokih napryazhenij. 2013. No 27. P. 83-89.

10. Kravchenko V.I., Jakovenko I.V., Losev F.V. Zatuhanie poverhnostnyh kolebanij poluprovodnikovyh struktur jeletroradioizdelij v uslovijah vozdejstvija storonnogo jeletromagnitnogo izluchenija [Attenuation of surface oscillations of semiconductor structures of electronic products under conditions of exposure to external electromagnetic radiation]. Vestnik NTU "KhPI". Sbornik nauchnyh trudov. Seriya: Tehnika i elektrofizika vysokih napryazhenij. 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 struktur v uslovijah vozdejstvija storonnogo 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". Sbornik nauchnyh trudov. Seriya: Tehnika i elektrofizika vysokih napryazhenij. 2013. No 27. P. 103-111.

*Поступила (received) 20.10.2018.*

### 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 «ХПИ»; тел. (057) 707-60-79; e-mail: nii90@email.ua

**Яковенко Ігор Володимирович (Яковенко Игорь Владимирович, Yakovenko Igor Vladimirovich)** – доктор фізико-математичних наук, професор, професор кафедри «Системи інформації» НТУ «ХПИ»; тел. (057) 707 66 18; e-mail: yakovenko60IV@ukr.net

**Ваврив Людмила Владиславівна (Ваврив Людмила Владиславовна, Vavriv Ljudmila Vladislavovna)** – кандидат фізико-математичних наук, старший науковий співробітник, Науково-дослідний та проектно-конструкторський інститут «Молнія» НТУ «ХПИ», тел.: (057) 707-63-09; e-mail: l.v.vavriv@gmail.com.