

**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  $y = y_0(x)$ :

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

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:

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

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  $k_x > G/2$  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, то есть  $\Psi \sim e^{-t/\tau}$  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  $R \approx 10^{-4}$  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 поляритонов, 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. 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. Стил 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.Халамеда, 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, 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. 10. 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. 11. Кравченко В.И. Затухание поверхностных колебаний полупроводниковых электрорадиоизделий в условиях воздействия стороннего электромагнитного излучения / В.И.Кравченко, И.В.Яковенко, Ф.В.Лосев // Вестник НТУ «ХПИ». – 2013. – № 27. – С. 96–103. 12. 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. Мырова Л.О., Чепиженко А.З. Обеспечение стойкости аппаратуры связи к ионизирующим электромагнитным излучениям. Moscow: Radio i svjaz', 1988. 235. Print. 2. Михайлов М.И., Разумов Л.Д. and Sokolov S.A. Jelektromagnitnye vlijaniya na sooruzhenija svjazi. 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. Jelektromagnitnye javlenija SVCh – diapazona v neodnorodnyh poluprovodnikovyx strukturah. Kyiv: Naukova dumka, 1991. 216. Print. 5. Zi C. Fizika poluprovodnikovyx priborov. Moscow: Mir, 1984. 456. Print. 6. Kravchenko V.I., Jakovenko V.I., Jakovenko I.V., Losev F.V. Vlijanie storonnego jelektromagnitnogo izlucheniya na volnovodnye harakteristiki poluprovodnikovovyh komplektujushhh jelektroradioizdelij. Vestnik NTU "KhPI". 2009. No 11. 62–69. Print. 7. Kravchenko V.I., Jakovenko I.V., Losev F.V. Vozbuzhdenie jelektromagnitnyh kolebanij v 2-D jelektronnyh 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 jelektromagnitnyh kolebanij poluprovodnikovoj struktury v uslovijah storonnego jelektromagnitnogo vozdejstvija. Vestnik NTU "KhPI". 2012. No 21. 161–169. Print. 9. Kravchenko V.I., Jakovenko I.V., Losev F.V. Vlijanie potoka zarjzhennyh chastic. Navedenno vneshnim jelektromagnitnym izlucheniem, na volnovodnye harakteristiki poluprovodnikovyx komplektujushhh jelektroradioizdelij. Vestnik NTU "KhPI". 2012. No 21. 161–169. Print. 10. Kravchenko V.I., Jakovenko I.V., Losev F.V. Zatuhanie poverhnostnyh kolebanij poluprovodnikovyx stuktur jelektroradioizdelij v uslovijah vozdejstvija storonnego jelektromagnitnogo izlucheniya. Vestnik NTU "KhPI". 2013. No 27. 89–96. Print. 11. Kravchenko V.I., Jakovenko I.V., Losev F.V. Kineticheskie mehanizmy vzaimodejstvija poverhnostnyh kolebanij s jelektronami provodimosti poluprovodnikovyx struktur v uslovijah vozdejstvija storonnego jelektromagnitnogo izlucheniya. Vestnik NTU "KhPI". 2013. No 27. 103–111. Print.

Поступила (received) 07.09.2015

#### 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 "Molniya" 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 66 18, 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** – Candidat 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 Information NTU "KhPI". Tel. (057) 707 66 18, e-mail: yakovenko60IV@mail.ru