ВЛИЯНИЕ БЕСПОРЯДКА НА ЛОКАЛИЗАЦИОННЫЕ СВОЙСТВА ЩЕЛЕВЫХ ГРАФЕНОВЫХ СВЕРХРЕШЕТОК

Е.С. Азарова, Г.М. Максимова

кафедра теоретической физики

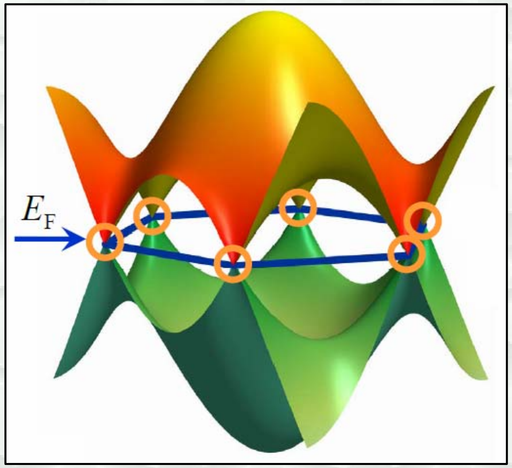
ННГУ им. Н.И. Лобачевского

XIV Школа-конференция молодых ученых

«Проблемы физики твердого тела и высоких давлений», 2015

Графен

$$\boxed{\mu \approx 2\cdot 10^5 \frac{см^2}{В\cdot с}} \quad -подвижность \quad носителей$$

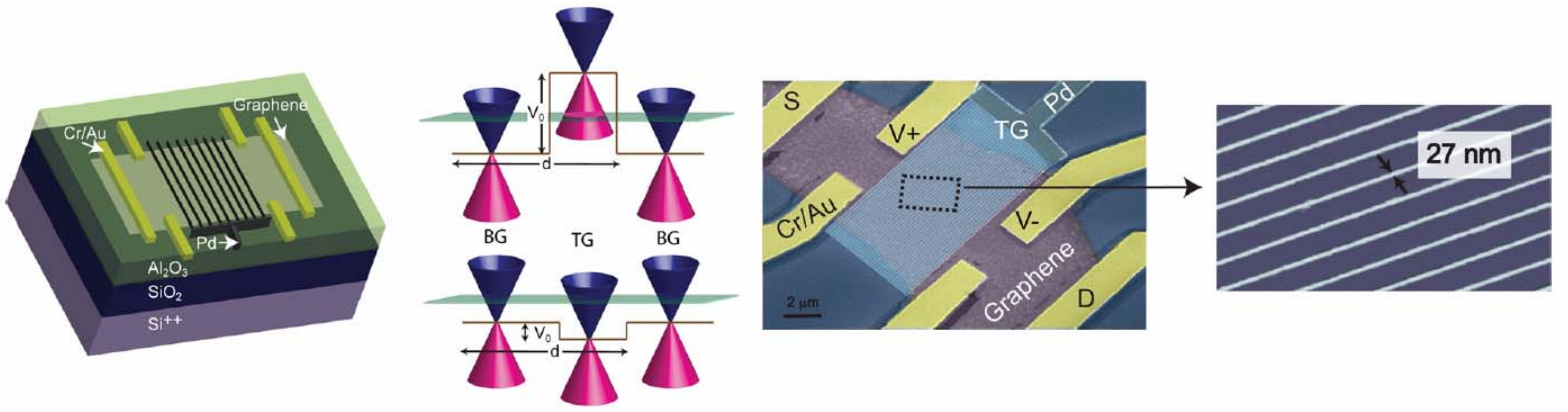


$$E = \pm\upsilon_F\,|\vec{p}|, \quad \upsilon_F \approx 10^8\, см/с$$

$$\hat{H}\psi(x,y) = E\psi(x,y), \;\; \hat{H} = \upsilon_F\,(\sigma_x\hat{p}_x + \sigma_y\hat{p}_y)$$

Сверхрешетка на основе графена

S. Dubey et.al., Nano Lett. **13**, 3990 (2013) - эксперимент



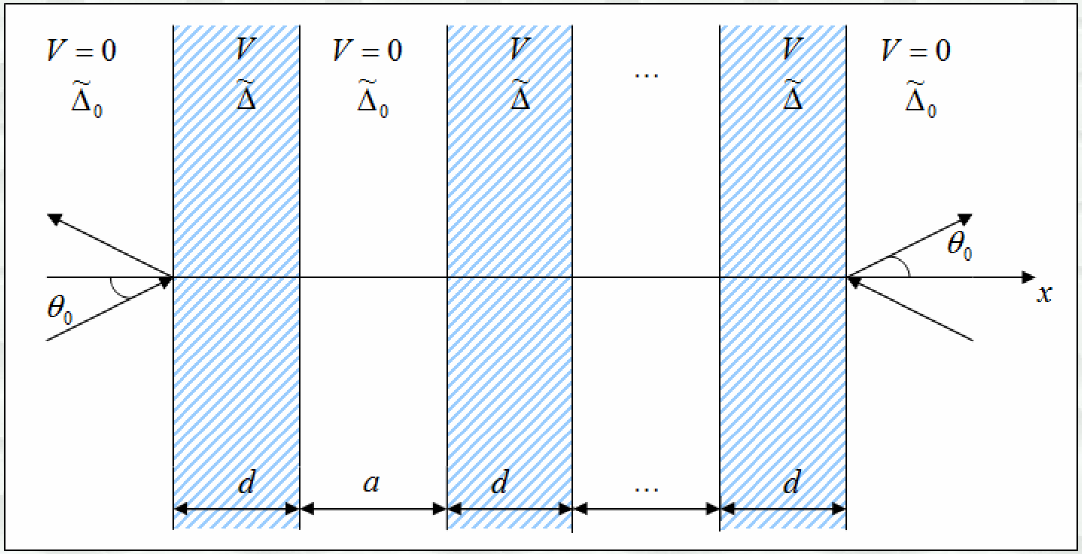
СР: модулированная энергетическая щель + внешний эл./ст. потенциал (теория):

G.M.Maksimova, E.S.Azarova, A.V.Telezhnikov, V.A.Burdov, Phys. Rev. B **86**, 205422 (2012).

E.S.Azarova, G.M.Maksimova, Physica E **61**, 118 (2014).

E.S.Azarova, G.M.Maksimova, Physica E **74**, 1 (2015).

Модель



$$\hat{H} = \upsilon_F(\sigma_x \hat{p}_x + \sigma_y \hat{p}_y) + V(x)\sigma_0 + \tilde{\Delta}(x)\sigma_z$$

$$V(x), \tilde{\Delta}(x) = \begin{cases} V, \tilde{\Delta} \text{ for } 0 < x < d, \\ 0, \tilde{\Delta}_0 \text{ for } d < x < l \end{cases}$$

$$l = a + d$$

$$\boxed{\begin{array}{l} \tilde{\Delta}_0 = \tilde{\Delta} \ - \ OCP \\ \tilde{\Delta}_0 = 0, \ \tilde{\Delta} \neq 0 \ - \ HCP \end{array}}$$

$$\text{Безразмерные параметры}: \frac{El}{\hbar\upsilon_F} \to \varepsilon, \ \frac{Vl}{\hbar\upsilon_F} \to \upsilon, \ \frac{\tilde{\Delta}l}{\hbar\upsilon_F} \to \Delta, \ a/l \to a, \ d/l \to d$$

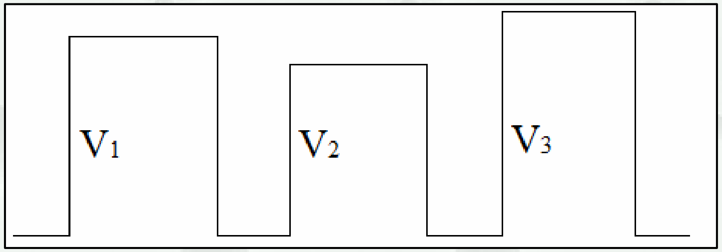
Неупорядоченная мультибарьерная структура

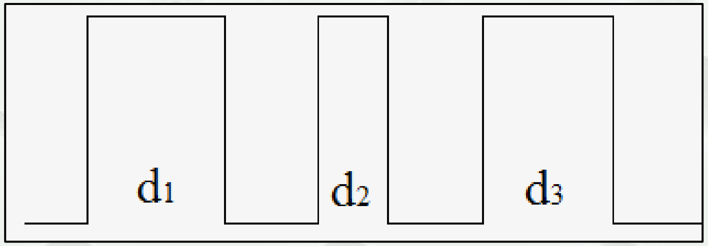
Энергетический беспорядок:

$$\upsilon_i = \upsilon(1+\rho_i^{\upsilon}), \ \Delta_i = \Delta(1+\rho_i^{\Delta})$$

Позиционный беспорядок:

$$a_i = a(1+\rho_i^{a}), \ d_i = d(1+\rho_i^{d})$$





$$\text{где} \ \ \rho_i^s \in [-\delta;\delta] \quad \sigma_s^2 << 1, \ s = \upsilon, \Delta, a, d$$

Длина локализации

$$L_{loc} = l/\gamma - \textit{длина локализации}$$

$$\gamma = -\lim_{N\to\infty}\left\langle \frac{\ln T_N}{2N} \right\rangle - \textit{показатель Ляпунова (обратная длина локализации)}$$

$$T = |t|^2 = |\hat{M}_{22}|^{-2} - \textit{коэффициент прохождения через систему}$$

$$\hat{M} = \prod_i S_i - \textit{матрица переноса}$$

Разложение трансфер-матрицы:

$$S_i = S + \varepsilon_i S' + \frac{\varepsilon_i^2}{2} S'' + O(\varepsilon_i^3)$$

(Q. Zhao, J. Gong, Phys. Rev. B **85**, 104201 (2012).)

$$\boxed{\gamma_s = \frac{s^2\sigma_s^2}{2}\tan^2\varphi \left[p'^2 + \left(\frac{\sin m}{\sin\varphi}\right)'^2 \frac{\tan^2\varphi}{\sin^2\eta} \right]} - \textit{разрешенные зоны}$$

$$\boxed{\sigma_s^2 << 1}$$

$$\cos\eta = \cos\alpha\cos\beta + f\sin\alpha\sin\beta - \textit{дисперсионное уравнение},$$

$$f = \frac{\varepsilon\upsilon - k_x^2}{k_x q_x}, \quad \alpha = k_x a, \quad \beta = q_x d$$

$$\boxed{\gamma_s = \ln\lambda_+} - \textit{запрещенные зоны}$$

E.S. Azarova, G.M. Maksimova, Physica E **74**, 1 (2015).

Позиционный беспорядок

$$\gamma_{a,d} = (f^2 - 1)\frac{\alpha^2\sigma_a^2 \sin^2\beta + \beta^2\sigma_d^2 \sin^2\alpha - 2\alpha\beta\sigma_{ad}\sin\alpha\sin\beta\cos\eta}{2\sin^2\eta}$$

Параметры :

$N = 10^3$

$\theta_0 = 0$

$a = d = 0.5$

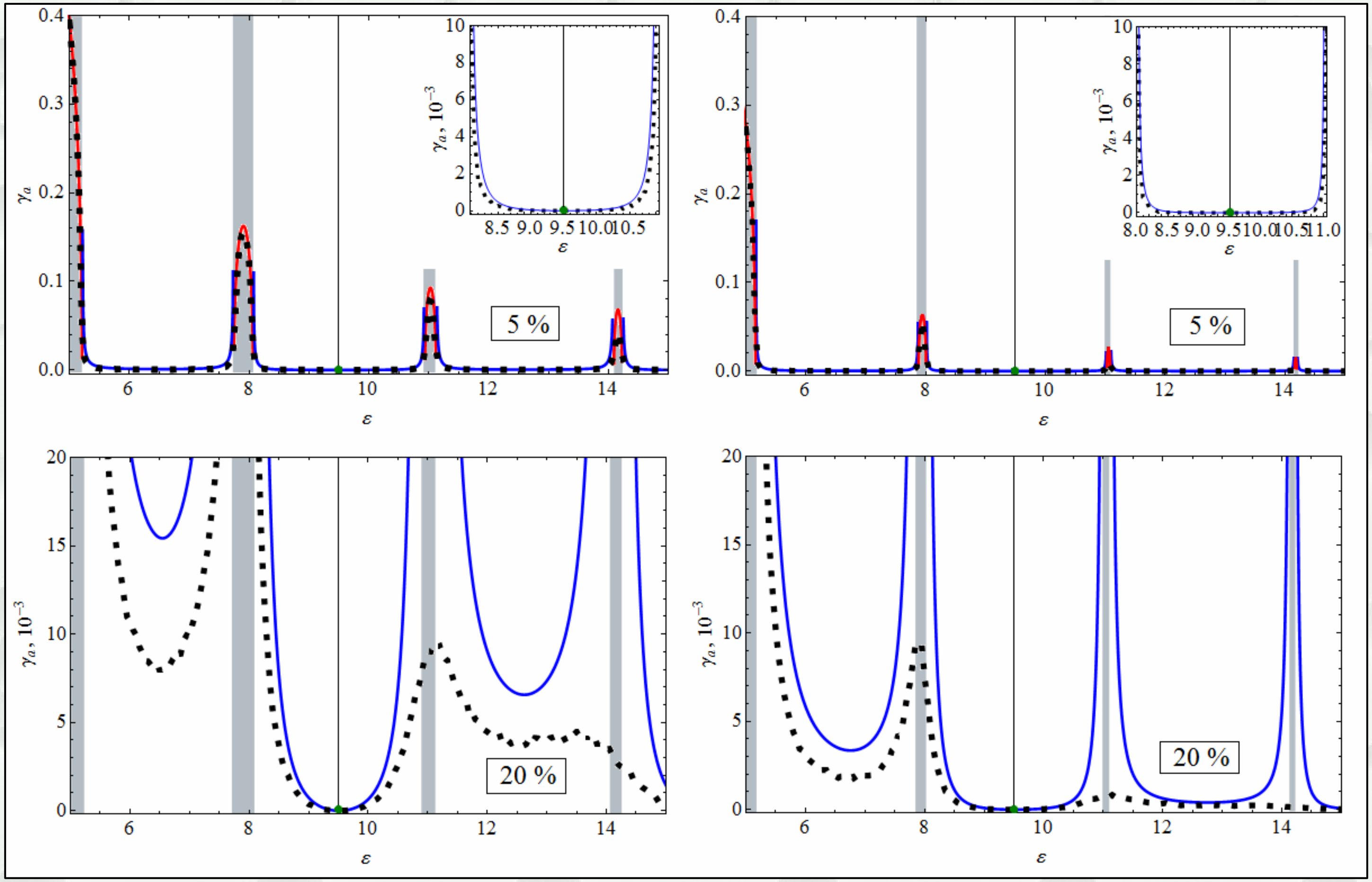
$\upsilon = \pi$

$\Delta = \pi/3$

$n = 80$

Флуктуации *межбарьерного расстояния* : $\sigma_a^2 = \delta^2/3,\ \sigma_d^2 = \sigma_{ad} = 0$

HCP: **OCP:**



Делокализационные резонансы :

$\gamma_a = 0 \Rightarrow \sin\beta = 0$

G.A. Luna-Acosta, F.M. Izrailev, N.M. Makarov, U. Kuhi, H.-J. Stöckmann, Phys. Rev. B **80**, 115112 (2009) – эксперимент

$$T_N = \left[1 + \left(f^2 - 1\right)\sin^2\beta \cdot \frac{\sin^2 N\eta}{\sin^2\eta}\right]^{-1},\ \sin\beta = 0 \Rightarrow T = 1 - \textit{резонансы Фабри} - \textit{Перо}$$

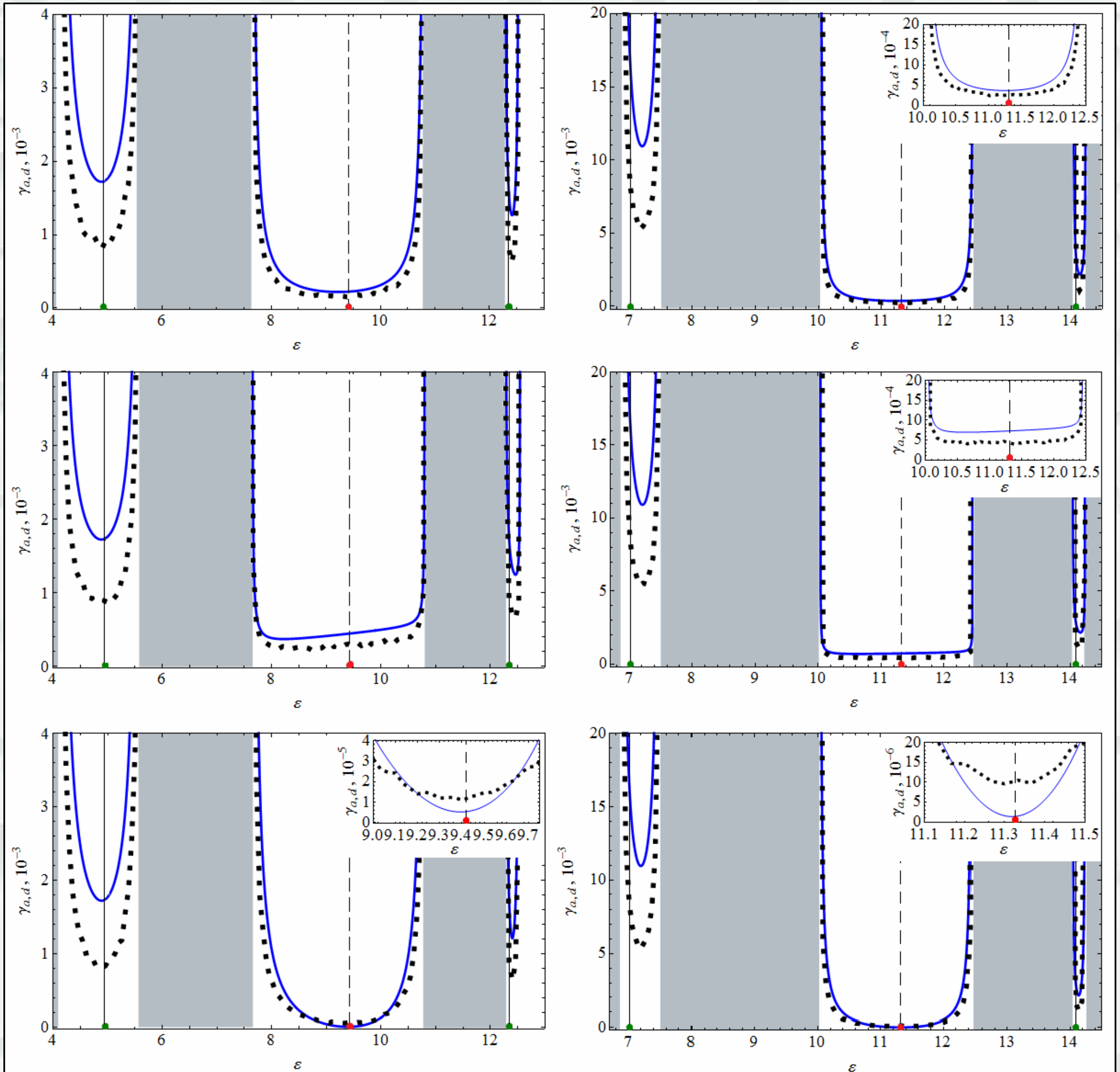
Флуктуации <u>межбарьерного расстояния и барьерной ширины</u> : $\sigma_a^2 = \sigma_d^2 = \delta^2/3$

HCP: **OCP:**

$\sigma_{ad} = 0$

$\sigma_{ad} = \dfrac{\delta^2}{3}$

$\sigma_{ad} = -\dfrac{\delta^2}{3}$



Параметры :

$\delta = 0.5\%$

$N = 5 \cdot 10^3$

$\cos\theta_0 = 2/3$

$a = d = 0.5$

$\upsilon = 8\pi - HCP$

$\upsilon = (5 + \sqrt{13})\pi$

$- OCP$

$\Delta = 2\pi$

$n = 100$

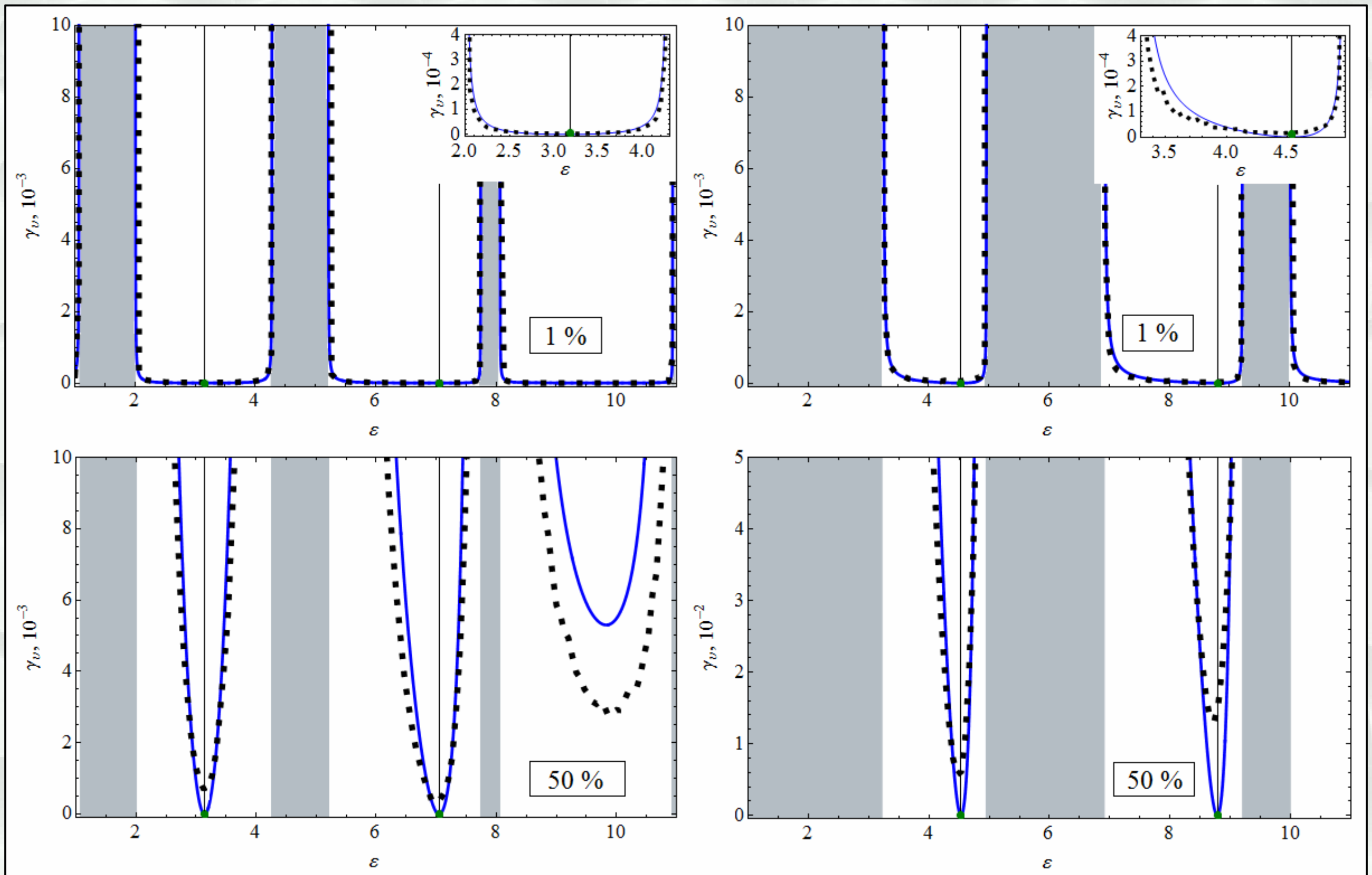
Энергетический беспорядок

Флуктуации <u>*внешнего потенциала*</u>: $\sigma_\upsilon^2 = \delta^2/3$

$$\gamma_\upsilon^{MSL} = \frac{\upsilon^2\sigma_\upsilon^2}{2q_x^2}\left[\frac{k_y^2\Delta^2\sin^2\beta}{S} + \frac{S(F^M\sin\alpha + G^M\cos\alpha)^2}{k_x^2 q_x^2\sin^2\eta}\right] - HCP$$

$$\gamma_\upsilon^{HSL} = \frac{\upsilon^2\sigma_\upsilon^2(k_y^2+\Delta^2)}{2k_x^2 q_x^2\sin^2\eta}\left(F^H\sin\alpha + G^H\cos\alpha\right)^2 - OCP$$

HCP: **OCP:**



Параметры :

$N = 5\cdot 10^3$

$\theta_0 = 0 - HCP$

$\theta_0 = \pi/6 - OCP$

$a = d = 0.5$

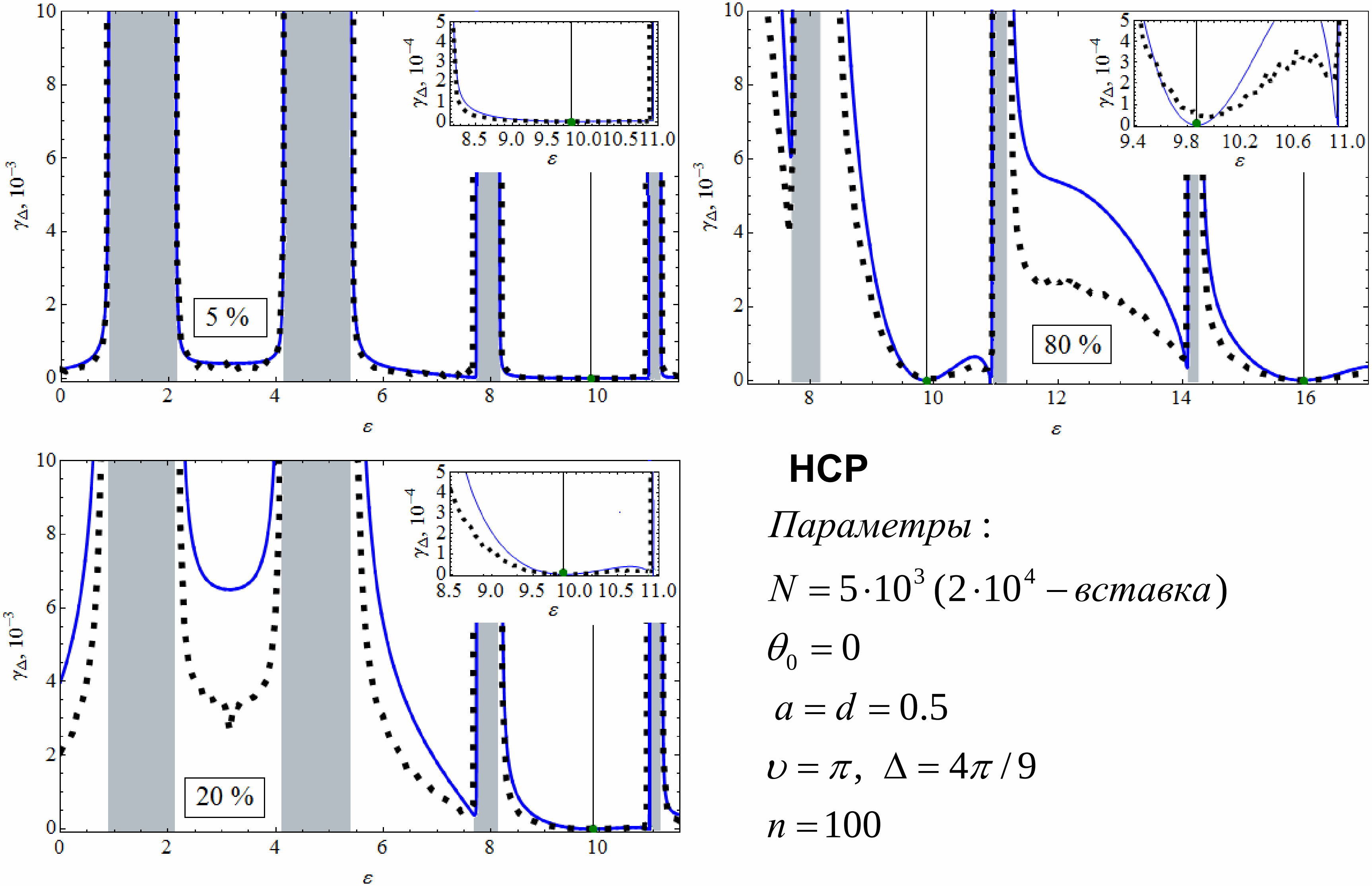
$\upsilon = \pi$

$\Delta = \pi/3$

$n = 80$

Флуктуации <u>энергетической щели</u>: $\sigma_\Delta^2 = \delta^2 / 3$

$$\gamma_\Delta^{MSL} = \frac{\Delta^2 \sigma_\Delta^2 \sin^2\beta}{2 q_x^2 S}\left[\frac{\Delta^2 \sin^2\beta}{k_x^2 q_x^2 \sin^2\eta}(F_\Delta \sin\alpha + G_\Delta \cos\alpha)^2 + \upsilon^2 k_y^2\right] - HCP$$



HCP

Параметры :

$N = 5 \cdot 10^3\,(2 \cdot 10^4 - вставка)$

$\theta_0 = 0$

$a = d = 0.5$

$\upsilon = \pi, \;\; \Delta = 4\pi / 9$

$n = 100$

Выводы:

1. Получено аналитическое выражение для обратной длины локализации (показателя Ляпунова) для щелевых графеновых сверхрешеток в приближении слабого беспорядка.

2. Делокализационные резонансы, связанные с флуктуациями ширины барьера (межбарьерной области) устойчивы к возрастанию степени беспорядка.

3. Основной эффект корреляций, который заключается в изменении длины локализации, проявляется вблизи двойных резонансов.

4. Делокализационные резонансы, обусловленные энергетическим беспорядком, являются приближенными в отличие от резонансов Фабри-Перо.

5. Для массивных дираковских частиц (однородная сверхрешетка) в случае флуктуаций высоты барьеров резонансные условия могут быть выполнены при произвольных углах падения, в то время как в структурах с неоднородной щелью делокализация возможна только для нормально падающих частиц.

СПАСИБО ЗА ВНИМАНИЕ!

ПРИЛОЖЕНИЕ

References:

[1] C.-H. Park,L.Yang,Y.-W.Son,M.L.Cohen,S.G.Louie,Nat.Phys.4(2008)213.
[2] L. Brey,H.A.Fertig,Phys.Rev.Lett.103(2009)046809.
[3] M. Barbier,P.Vasilopoulos,F.M.Peeters,Phys.Rev.B81(2010)075438.
[4] L. Dell'Anna,A.DeMartino,Phys.Rev.B79(2009)045420.
[5] V.Q. Le,C.H.Pham,V.L.Nguyen,J.Phys.Condens.Matter24(2012)345502.
[6] D.P.Arovas,L.Brey,H.A.Fertig,E.-A.Kim,K.Zeigler,NewJ.Phys.12(2010) 123020.
[7] M. Esmailpour, et. al,SolidStateCommun.150(2010)655.
[8] S. Dubey,et.al.,NanoLett.13(2013)3990.
[9] Li-Gong Wang,XiChen,J.Appl.Phys.109(2011)033710.
[10] Y.-W.Son,M.L.Cohen,S.G.Louie,Phys.Rev.Lett.97(2006)216803.
[11] M.Y.Han,B.Özyilmaz,Y.Zhang,P.Kim,Phys.Rev.Lett.98(2007)206805.
[12] Q. Yan et. al.,Nano Lett. 7(2007)1469.
[13] W.Apel,G.Pal,L.Schweitzer,Phys.Rev.B83(2011)125431.
[14] G. Gui,J.Li,J.Zhong,Phys.Rev.B78(2008)075435.
[15] V.M. Pereira,A.H.CastroNeto,N.M.R.Peres,Phys.Rev.B80(2009)045401.
[16] R.M. Ribeiro,N.M.R.Peres,J.Coutinho,P.R.Briddon,Phys.Rev.B78(2008) 075442.
[17] G. Giovanetti et. al.,Phys.Rev. B 76(2007)073103.
[18] S.Y.Zhou,et.al.,Nat.Mater.6(2007)770.
[19] Di Xiao,Gui-BinLiu,W.Feng,X.Xu,WangYao,Phys.Rev.Lett.108(2012) 196802.
[20] Xiao Li,FanZhang,QianNiu,Phys.Rev.Lett.110(2013)066803.
[21] N.M.R. Peres,J.Phys.Condens.Matter21(2009)095501.
[22] Viana Gomes,N.M.R.Peres,J.Phys.Condens.Matter20(2008)325221.
[23] G. Giavaras,F.Nori,Appl.Phys.Lett.97(2010)243106.

[24] P.V.Ratnikov,A.P.Silin,Phys.SolidState52(2010)1763.
[25] G.M. Maksimova et.al.,Phys.Rev.B86 (2012)205422.
[26] E.S. Azarova,G.M.Maksimova,PhysicaE61(2014)118.
[27] H.A. Fertig,L.Brey,Phys.Trans.R.Soc.368(2010)5483.
[28] K. Nomura,M.Koshino,S.Ruy,Phys.Rev.Lett.99(2007)146806.
[29] Shi-Liang Zhu,Dan-WelZhang,Z.D.Wang,Phys.Rev.Lett.102(2009)210403.
[30] Yu.P.Bliokh,V.Freilikher,S.Savel'ev,F.Nori,Phys.Rev.B79 (2009)075123.
[31] N. Abedpour,A.Esmailpour,R.Asgari,M.Reza,R.Tabar,Phys.Rev. B 79(2009)165412.
[32] Qifang Zhao,JiangbinGong,CordA.Müller,Phys.Rev.B85(2012)104201.
[33] AyoubEsmailpour,FatemehPakdel,RaziehJahanaray,PhysicaE54(2013)214.
[34] P.Marcoš, CostasM.Soukoulis,PrincetonUniversityPress,Princeton, 2008.
[35] M.I. Katsnelson,K.S.Novoselov,A.K.Geim,Nat.Phys.2(2006)620.
[36] J. MiltonPereiraJr.,P.Vasilopoulos,F.M.Peeters,Appl.Phys.Lett.90(2007) 132122.
[37] A.V.Shytov,M.S.Rudner,L.S.Levitov,Phys.Rev.Lett.101(2008)156804.
[38] M. RamezaniMasir,P.Vasilopoulos,F.M.Peeters,Phys.Rev.B82(2010) 115417.
[39] G.A. Luna-Acosta et.al.,Phys. Rev.B80(2009)115112.
[40] D. Mogilevtsev et.al., Phys.Rev.B84(2011)094204.

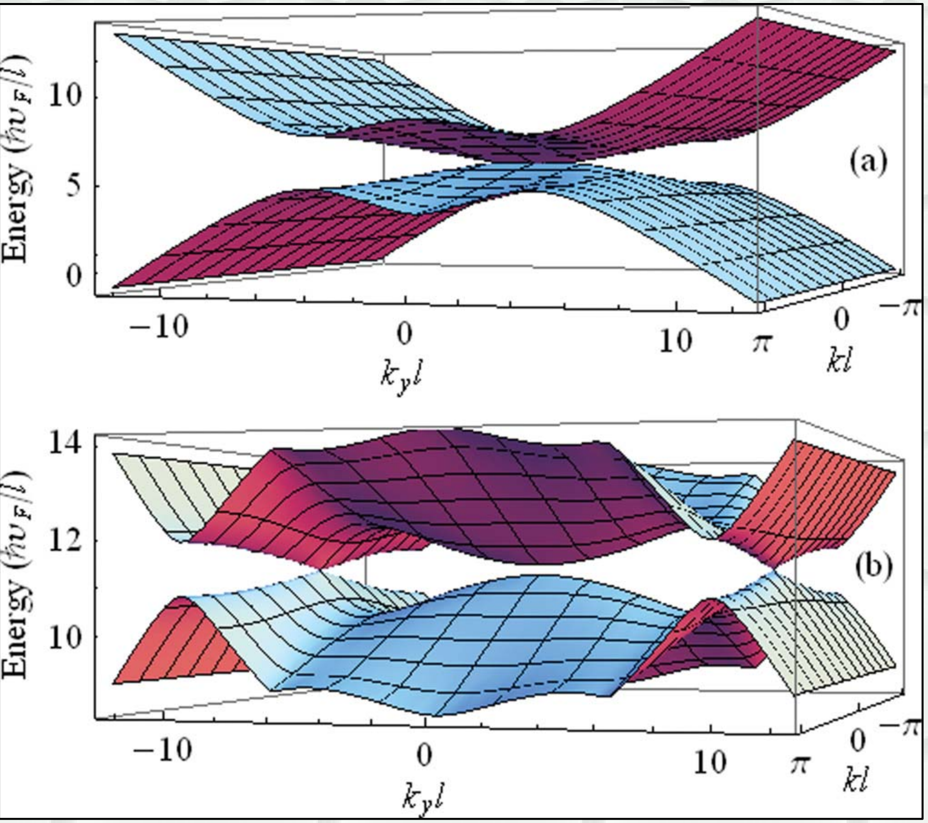
Волновой вектор

$$\alpha = k_x a, \ \ \beta = q_x d$$

НСР	ОСР
$k = \lvert \varepsilon \rvert, \ k_x = \lvert \varepsilon \rvert \cos\theta_0$	$k = \sqrt{\varepsilon^2 - \Delta^2}, \ k_x = \sqrt{\varepsilon^2 - \Delta^2} \cos\theta_0$
$q = \sqrt{(\varepsilon - \upsilon)^2 - \Delta^2},$ $q_x = \sqrt{(\varepsilon - \upsilon)^2 - \Delta^2 - \varepsilon^2 \sin^2\theta_0}$	$q = \sqrt{(\varepsilon - \upsilon)^2 - \varepsilon^2 + \Delta^2},$ $q_x = \sqrt{(\varepsilon - \upsilon)^2 - \Delta^2 - (\varepsilon^2 - \Delta^2)\sin^2\theta_0}$

Спектр ГСР с периодически модулированной щелью

$$E_0 = \frac{V^2 - \Delta^2}{2V} \qquad k_{yn} = \frac{1}{l}\sqrt{\left(\frac{E_0 l}{\hbar\upsilon_F}\right)^2 - (2\pi n)^2} \qquad V_n = \frac{\pi n\hbar\upsilon_F}{d} + \sqrt{\left(\frac{\pi n\hbar\upsilon_F}{d}\right)^2 + \Delta^2}$$



$$a = d = 30\,nm$$
$$\Delta = 26.5\,meV$$
$$V = 143.26\,meV$$

$$\varepsilon = \frac{\delta^4 (k_y l)^2}{4\pi u_c^2 (1+3\delta^2)} \pm \sqrt{\frac{(ql)^2}{1+3\delta^2} + \frac{1+3\delta^2+\delta^6/u_c^3}{(1+3\delta^2)^2}\cdot\frac{\delta^2 (k_y l)^4}{(4\pi)^2 u_c}}$$

$$a = d = 30\,nm$$
$$\Delta = 26.5\,meV$$
$$V = 165.15\,meV$$

$$\varepsilon = \beta \tilde{k}_y l \pm \sqrt{\alpha^2 (ql)^2 + (\beta^2+\gamma^2)(\tilde{k}_y l)^2}$$

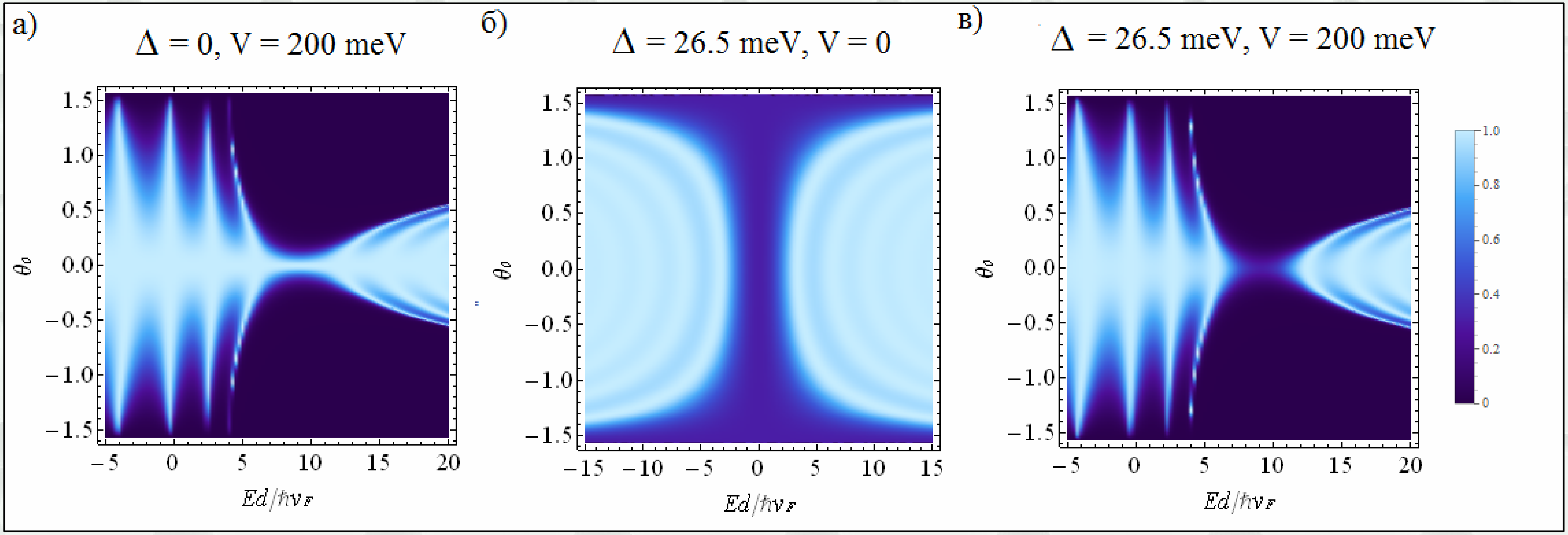
G.M. Maksimova, E.S. Azarova, A.V. Telezhnikov, V.A. Burdov, Phys. Rev. B **86**, 205422 (2012)

Коэффициент прозрачности однобарьерной структуры

$$\boxed{T(E,\theta_0)=\left(1+\frac{\sin^2 k_x d}{(\hbar\upsilon_F k_x)^2}\;\frac{\Delta^2\cos^2\theta_0+V^2\sin^2\theta_0}{\cos^2\theta_0}\right)^{-1}}$$

$$k_x=\frac{\sqrt{(E-V)^2-\Delta^2-E^2\sin^2\theta_0}}{\hbar\upsilon_F}$$

$d=30\,nm$

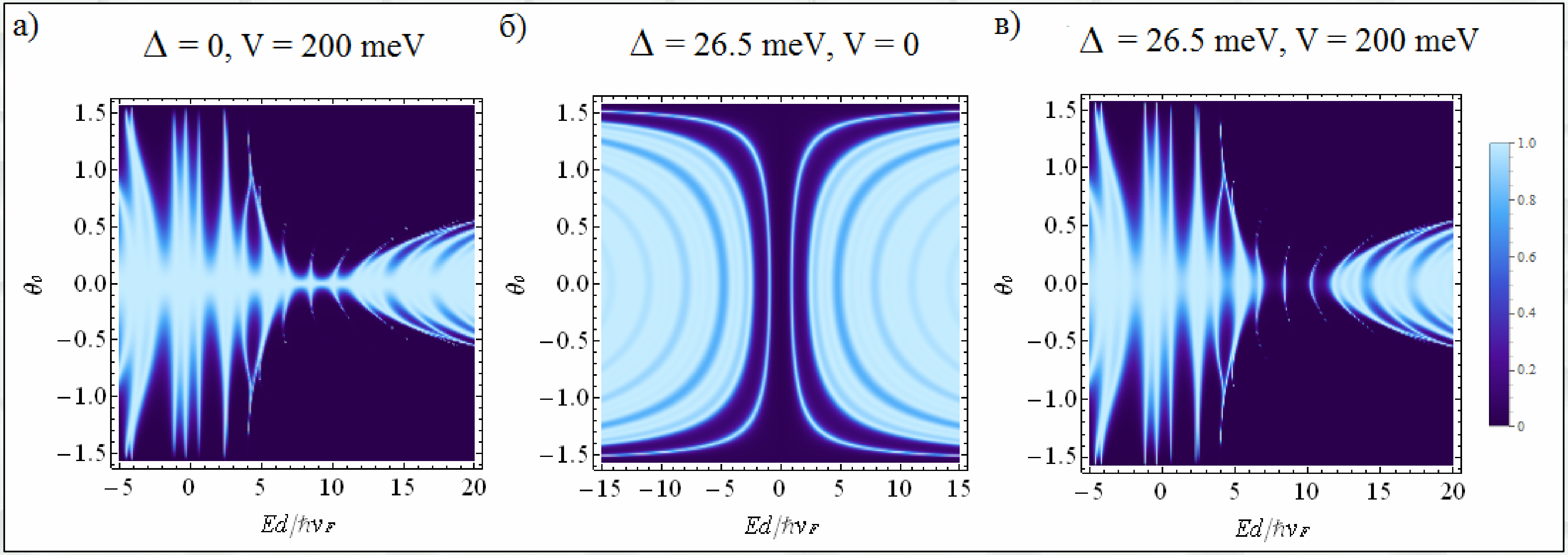


$\Delta=0,\ V\neq0:$ M.I. Katsnelson, K.S. Novoselov, A.K. Geim, Nat. Phys. **2** 620 (2006).

$\Delta\neq0,\ V=0:$ J.V. Gomes, N.M.R. Peres, J. Phys.: Condens. Matter **20** 325221 (2008).

$\Delta\neq0,\ V\neq0:$ E.S. Azarova, G.M. Maksimova, Physica E **61**, 118 (2014).

Рассеяние дираковских частиц двухбарьерным потенциалом



.

Рис. 17. Коэффициент прохождения квазичастиц через два потенциальных барьера при *a* = *d* = 30 *nm.*

E.S. Azarova, G.M. Maksimova, Physica E **61**, 118 (2014)

Энергетическая щель

Материал	E_g, эВ
Графен	0
Si	1.12
Ge	0.67
GaAs	1.42

Подвижность носителей

Материал	μ, см^2/(В·с)
Графен	$2 \cdot 10^5$
Si	1400
Ge	3900
GaAs	8500

Удельное сопротивление

Материал	ρ, Ом/см
Графен	$1 \cdot 10^{-6}$
Ag	$1.5 \cdot 10^{-6}$
Cu	$1.7 \cdot 10^{-6}$

Коэффициент теплопроводности

Материал	λ, Вт/(м·К)
Графен	5000
Ag	430
Cu	400
Al	210

Прочность и упругость

Материал	*E*, Па
Графен	$1 \cdot 10^{12}$
Ir	$520 \cdot 10^{9}$
W	$350 \cdot 10^{9}$
Cr	$300 \cdot 10^{9}$