

ГЕТЕРОСТРУКТУРА $Si/Si_{1-x}Ge_x$ КАК ПРИЕМНИК ИК ИЗЛУЧЕНИЯ

П.С. СЕРЕБРЕННИКОВ, доц. МГУЛ, канд. физ.-мат. наук⁽¹⁾

serebrennikov@mgul.ac.ru, physp37smat@gmail.com

⁽¹⁾ ФГБОУ ВО «Московский государственный университет леса»

141005, Московская обл., г. Мытищи-5, ул. 1-я Институтская, д. 1

Получены основные характеристики ИК приемника на основе гетероструктуры $Si/Si_{1-x}Ge_x$. Проведен расчет квантовой эффективности приемника. Найдена функция Грина диффузионного движения к гетерогранице $Si/Si_{1-x}Ge_x$ горячей дырки фотогенерированной в области сплава $Si_{1-x}Ge_x$. При движении горячей фотодырки возможно испускание оптического фонона, в результате чего дырка теряет энергию, не может преодолеть потенциальный барьер на гетерогранице и не дает вклада в ток. Вероятность достижения фотодырки гетерограницы зависит от места ее генерации, что, в свою очередь, определяется коэффициентом поглощения излучения и способом его введения: через подложку или при прямом падении излучения на область $Si_{1-x}Ge_x$. Квантовая эффективность зависит также от условия на границе $Si_{1-x}Ge_x$. Рассмотрены оба крайних случая: зеркальное отражение горячей дырки от границы и случай термализации горячей дырки на границе. В таблице приведено значение квантовой эффективности для разных длин области $Si_{1-x}Ge_x$, разных способов введения излучения и разных граничных условий на границе области $Si_{1-x}Ge_x$. Результаты отображены на рис. 2, 3. Длинноволновая граница приемника зависит как от мольной доли Ge в сплаве (x), что определяет величину разрыва верха валентной зоны при переходе от кремния к $Si_{1-x}Ge_x$, так и от уровня Ферми в сплаве. При мольной доле $Ge_x = 0,3$ разрыв верха валентной зоны при переходе от кремния к сплаву будет 0,2 э-в и при уровне Ферми 0,15 э-в потенциальный барьер для дырок получается равным 0,05 э-в. Такой потенциальный барьер соответствует длинноволновой границе 24,8 мкм. При температуре 77 °К шумовые свойства определяются флуктуациями темнового тока через гетеропереход. В таблице приведены рассчитанные характеристики ИК приемника на основе гетероперехода $Si/Si_{1-x}Ge_x$.

Ключевые слова: метод функции Грина, коэффициент поглощения ИК излучения, длина области сплава кремний–германий, квантовая эффективность, длина свободного пробега относительно испускания оптических фононов.

Фотоприемники на основе эффекта Шоттки, например $PtSi/Si$, позволили создать самые большие фокальные матрицы. Малый разброс параметров между отдельными элементами многоэлементного приемника, удобство сопряжения приемников $PtSi/Si$ со схемами обработки сигнала на основе кремния определяют их преимущество перед другими приемниками ИК излучения. Длинноволновая граница зависит от высоты потенциального барьера и для $PtSi/Si$ находится в средневолновом ИК диапазоне (5–6 мкм). В 1971 г. был предложен ИК приемник на основе гетероструктуры $Si/Si_{1-x}Ge_x$ [1–11] (рис. 1). Область $Si_{1-x}Ge_x$ имеет длину L . Здесь изображено падение излучения (кривая 1) через подложку (Si). В расчетах будет рассмотрен и другой случай, когда излучение падает непосредственно на область $Si_{1-x}Ge_x$. Высоту потенциального барьера здесь можно менять, изменяя долю германия в $Si_{1-x}Ge_x$ сплаве (x). С увеличением доли Ge разрыв верха валентной зоны между сплавом $Si_{1-x}Ge_x$ и Si , который и является потенциальным барьером для дырок, увеличивается. Поглощение ИК излучения происходит на дырках и для увеличения поглощения производится вырожденное

легирование области $Si_{1-x}Ge_x$. Изменение степени легирования изменяет уровень Ферми в $Si_{1-x}Ge_x$ и, следовательно, высоту потенциального барьера ϕ_b . Высота потенциального барьера равна $\Delta E_v - E_F$, здесь ΔE_v – разрыв верха валентной зоны при переходе от $Si_{1-x}Ge_x$ к Si , а E_F – уровень Ферми относительно верха валентной зоны. Дырки в области $Si_{1-x}Ge_x$, поглощая ИК фотон, приобретают энергию,

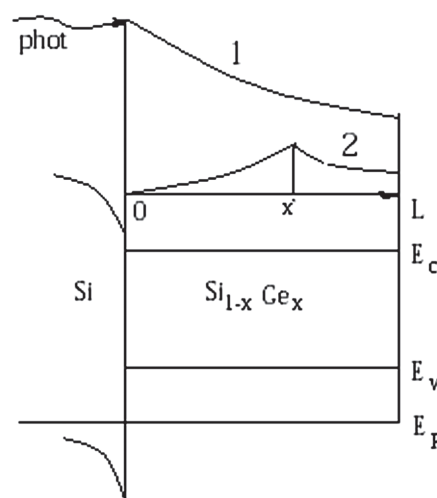


Рис. 1. Зонная диаграмма гетероструктуры $Si/SiGe$ и функция Грина

Fig. 1. The band diagram of the heterostructure $Si/SiGe$ and the Green's function

достаточную для преодоления потенциально-го барьера. Горячие дырки могут испустить оптический фонон при диффузионном движении к гетеропереходу $Si/Si_{1-x}Ge_x$. Испустив оптический фонон, дырка теряет энергию и не может уже преодолеть потенциальный барьер и дать вклад в ток. Для определения таких важнейших характеристик ИК приемников, как квантовая эффективность и фоточувствительность, необходимо рассмотреть процессы поглощения ИК излучения дырками и диффузионное движение горячих фото-дырок к границе гетероперехода $Si/Si_{1-x}Ge_x$.

Концентрация фотодырок подчиняется уравнению

$$D_p \frac{d^2}{dx^2} \Delta p - \frac{\Delta p}{\tau_e} + g = 0,$$

где D_p – коэффициент диффузии горячих дырок;

τ_e – время пробега горячих дырок относительно испускания оптических фононов;

g – скорость генерации горячих дырок ИК излучением.

Скорость генерации записывается в виде $g = s_0 e^{-\alpha x}$ при падении излучения через подложку и $g = s_0 e^{\alpha(x-L)}$ при прямом падении излучения на область $Si/Si_{1-x}Ge_x$. (α – коэффициент поглощения излучения, s_0 – плотность излучения на границе, $x = 0$ – гетерограница).

Граничные условия на $\Delta p(x)$: $\Delta p(0) = 0$ (горячие дырки, достигшие гетерограницу, уходят в Si) и $\Delta p'(L) = 0$ (горячие дырки отражаются от границы области $Si_{1-x}Ge_x$ и поэтому поток на границу области равен 0). Уравнение для функции Грина (функции влияния точечного источника) (рис. 1 кривая 2) имеет вид

$$(D_p \frac{d^2}{dx^2} - \frac{1}{\tau_e}) G(x, x') = -\delta(x - x')$$

Граничные условия для функции Грина будут равны соответственно

$$G(x, x')|_{x=0} = 0 \quad G'(x, x')|_{x=L} = 0$$

С учетом приведенных граничных условий и принимая во внимание равенство $D_p G'(x, x')|_{x=0} = -1$, получаем функцию Грина

$$G(x, x') = \sqrt{\frac{\tau_e}{D_p}} \frac{ch\chi(x'-L)}{ch\chi L} \times \left[\theta(x'-x) sh\chi x + \theta(x-x') \frac{sh\chi x' ch\chi(x-L)}{ch\chi(x'-L)} \right]$$

где sh, ch – гиперболические синус и косинус;

$$\chi = \frac{1}{\sqrt{D_p \tau_e}}.$$

Плотность горячих дырок и их поток через гетерограницу выражаются через функцию Грина

$$\Delta p(x) = \int_0^L G(x, x') g(x') dx'$$

$$I_p = -D_p \frac{d}{dx} \Delta p(x)|_{x=0}$$

С помощью найденной функции Грина получаем вероятность поглощения фотона с энергией большей пороговой энергии и достижения горячей дырки гетерограницы в виде

$$W_1 = \frac{\alpha}{ch\chi L} \int_0^L ch\chi(x'-L) e^{-\alpha x'} dx'$$

Эта вероятность написана для случая падения излучения через подложку. Соответствующая вероятность при прямом падении будет

$$W_2 = \frac{\alpha}{ch\chi L} \int_0^L ch\chi(x'-L) e^{\alpha(x'-L)} dx'$$

До сих пор считалось, что на границе области $Si_{1-x}Ge_x$ горячие дырки зеркально отражаются. Это является наиболее благоприятным случаем. Худшим случаем будет случай термализации горячих дырок на границе области $Si_{1-x}Ge_x$, когда горячая дырка испускает оптический фонон на границе, теряет свою энергию и не дает вклада в фототок, т. к. не может преодолеть потенциальный барьер на гетерогранице. Этот случай отвечает граничному условию $\Delta p(L) = 0$ ($G(x, x')|_{x=L} = 0$). Решаем опять дифференциальное уравнение для функции Грина для этих граничных условий ($G(x, x')|_{x=0} = G(x, x')|_{x=L} = 0$). По найденной функции Грина находим вероятность поглощения фотона с энергией большей пороговой энергии и достижения горячей дырки гетерограницы для случая падения излучения через подложку W_3 и при прямом падении W_4

$$W_3 = \frac{\alpha}{sh\chi L} \int_0^L sh\chi(L-x') e^{-\alpha x'} dx'$$

$$W_4 = \frac{\alpha}{sh\chi L} \int_0^L sh\chi(L-x') e^{\alpha(x'-L)} dx'.$$

Зависимость квантовой эффективности от коэффициента поглощения излучения, длины области $Si_{1-x}Ge_x$ и способа введения излучения
The dependence of the quantum efficiency of the light absorption coefficient, the length of the $Si_{1-x}Ge_x$ and field emission method of administration

	10 нм	15 нм	20 нм	25 нм	30 нм	35 нм	40 нм
W_{11}	0,044	0,052	0,055	0,056	0,057	0,057	0,057
W_{12}	0,14	0,16	0,167	0,168	0,168	0,168	0,167
W_{21}	0,044	0,052	0,054	0,054	0,053	0,051	0,05
W_{22}	0,137	0,153	0,151	0,143	0,132	0,121	0,111
W_{31}	0,027	0,037	0,044	0,049	0,052	0,054	0,055
W_{32}	0,087	0,116	0,136	0,15	0,156	0,161	0,163
W_{41}	0,027	0,036	0,042	0,046	0,048	0,048	0,048
W_{42}	0,08	0,104	0,115	0,12	0,117	0,112	0,105

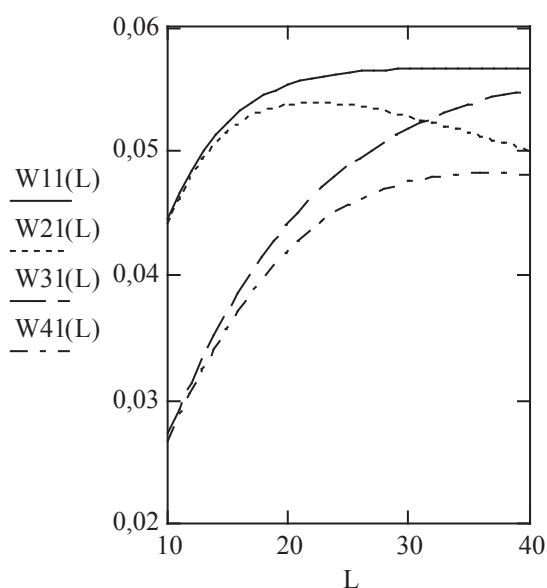


Рис. 2. Зависимость коэффициентов W_{11} , W_{21} , W_{31} , W_{41} от длины области $Si_{1-x}Ge_x$. Коэффициент поглощения $\alpha = 6 \cdot 10^4 \text{ см}^{-1}$
 Fig. 2. Dependence coefficients W_{11} , W_{21} , W_{31} , W_{41} of length field of $Si_{1-x}Ge_x$ absorption coefficient $\alpha = 6 \cdot 10^4 \text{ см}^{-1}$

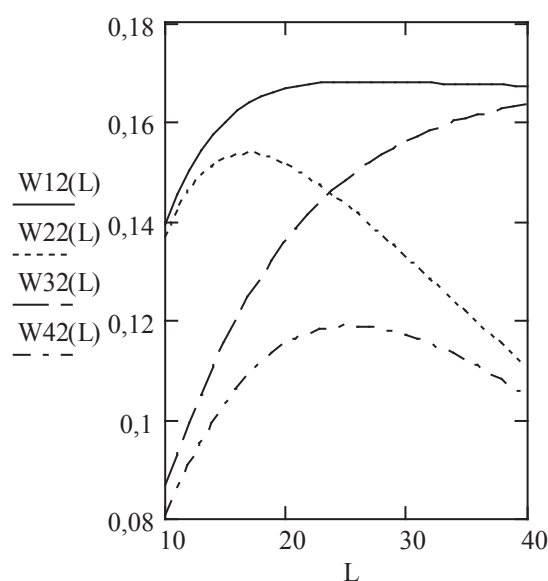


Рис. 3. Зависимость коэффициентов W_{12} , W_{22} , W_{32} , W_{42} от длины области $Si_{1-x}Ge_x$. Коэффициент поглощения $\alpha = 2 \cdot 10^5 \text{ см}^{-1}$
 Fig. 3. The dependence of the coefficients W_{12} , W_{22} , W_{32} , W_{42} of the length of the field $Si_{1-x}Ge_x$ absorption coefficient $\alpha = 2 \cdot 10^5 \text{ см}^{-1}$

В табл. 1 и на рис. 2 и 3 представлены результаты расчетов функции $Wi(L)$ для двух значений коэффициентов поглощения излучения $\alpha = 6 \cdot 10^4 \text{ см}^{-1}$ и $\alpha = 2 \cdot 10^5 \text{ см}^{-1}$ (соответствующие вероятности имеют дополнительные индексы 1 и 2 соответственно); длина пробега горячей дырки относительно испускания оптического фона $l_e = \sqrt{D_p \tau_e}$ принята равной $l_e = 10 \text{ нм}$. Видна сильная зависимость квантовой эффективности прежде всего от коэффициента поглощения излучения, а, следовательно, от легирования области $Si_{1-x}Ge_x$. При большом коэффициенте поглощения и вводе

излучения через подложку квантовая эффективность выходит на насыщение уже при небольших длинах области $Si_{1-x}Ge_x$. При прямом вводе квантовая эффективность меньше и начинает убывать при больших длинах L . Как и следовало ожидать, при термализации дырок на границе области $Si_{1-x}Ge_x$ квантовая эффективность уменьшается.

Наглядное изображение рассмотренных зависимостей дается на рис. 2 и 3.

Вероятность поглощения ИК фотона и достижения горячей дырки гетерограницы определяют такую важнейшую характе-

Характеристики ИК приемника на основе гетероструктуры $Si/Si_{1-x}Ge_x$
Features IR receiver on the basis of heterostructures $Si/Si_{1-x}Ge_x$

λ_0 , мкм	α , см ⁻¹	R_{λ} , АБТ ⁻¹	In , нАсм ⁻¹ Гц ^{-0.5}	D^* , смГц ^{0.5} ВТ ⁻¹
24,8	$6 \cdot 10^4$	0,46	2,12	$2,17 \cdot 10^8$
24,8	$2 \cdot 10^5$	1,35	2,12	$6,37 \cdot 10^8$

ристику, как квантовая эффективность. Из результатов расчета следует, что квантовая эффективность сильно зависит от коэффициентов поглощения и максимальна при вводе излучения через подложку. При приеме слабых сигналов важны шумовые характеристики приемника. Считая $\Delta E_v = 0,2$ э-в при $x = 0,3$ и $E_F = 0,15$ э-в [2], получаем длинноволновую границу $\lambda_0 = 1,24 / 0,05 = 24,8$ мкм. При рабочей температуре 77 °К шумовые свойства определяются флуктуациями темнового тока.

При более низких температурах можно выйти на режим ограничения флуктуациями фона. Используя константу Ричардсона 4.4 Асм⁻²·К⁻² [2], получаем плотность темнового тока при $T = 77^\circ$ и $\lambda_0 = 24,8$ мкм $I_d = 14$ Асм⁻². Характеристики ИК приемника для двух значений коэффициентов поглощения сведены в табл. 2.

Библиографический список / References

1. Shepherd, F.D., Vickers, V.E. and Yang, A.C., "Schottky-Barrier Photodiode with a Degenerate Semiconductor Active Region", U.S. Patent N 3603847, September 7, 1971.
2. Lin, T.L., Park, J.S., Gunapala, S.D., Jones, E.W., Del Castillo, H.M., $Si_{1-x}Ge_x / Si$ heterojunction infrared photoemission long wavelength infrared detector. Proc. SPIE, Vol.2274. 1994 P. 17-23.
3. Tsaur, B.-Y., Chen, C.K., Marino, S.A., Long-wavelength $Si_{1-x}Ge_x / Si$ heterojunction infrared detectors and focal plane arrays. Proc. SPIE, Vol.1540. 1991 P. 580-595.
4. Miesner, C., Asperger, T., Brunner, K., Abstreiter, G., Capacitance-voltage and admittance spectroscopy of self-assembled Ge islands in Si. Appl. Phys. Lett. Vol. 77. 2000, pp. 2704-2706.
5. Brunner, K., Si/Ge nanostructures. Rep. Prog. Phys. Vol. 65. 2000, P. 27-72.
6. Philips, J., Evaluation of the fundamental properties of quantum detectors. J. Appl. Phys. Vol. 91, 2002, pp. 4590-4594.
7. Dvurechenskii, A.V., Nikiforov, A.I., Bloshkin, A.A., Nenashev, A.V., Volodin, V.A., Electronic states in Si / Ge quantum dots with type-II band alignment. Physical Review B., Vol.73,2006, pp. 115– 121.
8. Wang, K.L., Cha, D., Liu, J., Chen, C., Ge/Si self-assembled quantum dots and their optoelectronic device applications. Proc. of the IEEE, Vol.95, 2007, pp. 1866-1882.
9. Li, X., Xu, W., Cao, S., Cai, Q., Lu, F. Admittance spectroscopy of GeSi-based quantum dot systems: Experiment and Theory. Physical Review B., Vol. 76, 2007, pp. 245-257.
10. Yakimov, A.I. Ge/Si heterostructures with Ge quantum dots for mid-infrared photodiode detectors. Optoelectronics, Instrumentation and Data Processing Vol. 49, 2013, pp. 467-475.
11. Lozovoy, K.A., Voytsekhovskiy, A.V., Kokhanenko, A.P., Satarov, V.G., Phelyakov, O.P., Nikiforov, A.I., Heterostructures with self-organized quantum dots of Ge on Si for optoelectronic devices. Opto-Electronics Review Vol.22, 2014, pp. 171-177.

HETEROSTRUCTURE $Si/Si_{1-x}Ge_x$ IR DETECTOR

Serebrennikov P.S., Assoc. Prof. MSFU, Ph.D. (Tech.)⁽¹⁾

serebrennikov@mgul.ac.ru, physp37smat@gmail.com

⁽¹⁾ Moscow State Forest University, MSFU, 1, 1st Institutskaya st., Mytischki-5, Moscow reg., 141005, Russia

The basic characteristics of heterostructure $Si/Si_{1-x}Ge_x$ IR detector are obtained. Detector quantum efficiency calculation is carried out. Hot holes generated in $Si_{1-x}Ge_x$ region diffuse towards heterojunction $Si/Si_{1-x}Ge_x$. Diffusion motion of hot holes Green function is determined. Hot photohole can emit optical phonon hereupon it loses energy, cannot overcome the potential barrier and does not contribute to the electrical current. The probability of hot photohole achievement of heterojunction depends on the place of its generation, which in turn is determined by the radiation absorption coefficient and method of illumination: front side illumination or backside (through the substrate). The quantum efficiency also depends on the boundary condition at the boundary $Si_{1-x}Ge_x$. Both extreme cases are considered: a specular reflection of the hot holes and thermalization of hot holes at the boundary that is hot holes die on boundary. The quantum efficiency for different lengths of $Si_{1-x}Ge_x$ region, different methods of illumination and different boundary conditions on the boundary $Si_{1-x}Ge_x$ are given in the table. The results are also shown in Fig. 2,3. Cutoff wavelength of the detector depends both on the mole fraction of Ge in the alloy (x) that determines top valence gap between Si and $Si_{1-x}Ge_x$ and Fermi level in the alloy. When the Ge mole fraction is equal $x = 0.3$ top valence gap between Si and $Si_{1-x}Ge_x$ is 0.2 eV and if the Fermi level is 0.15 eV potential barrier for holes is equal to 0.05 eV. This potential barrier corresponds to cutoff wavelength 24.8 μ m. At a temperature of 77°K noise properties are determined by the dark current fluctuations. The table shows the calculated characteristics of heterostructure $Si/Si_{1-x}Ge_x$ IR detector.

Keywords: Method of Green function, absorption coefficient of IR radiation, quantum efficiency, thickness of alloy silicon – germanium layer, inelastic mean free path.