

Влияние поверхностной рекомбинации на параметры фотодиодов из полупроводниковых структур HgCdTe

Н. И. Яковлева

Проведены расчеты скорости поверхностной рекомбинации для слоев HgCdTe p-типа проводимости при различных концентрациях легирующих примесей и плотности концентрации ловушек N_t . Показано, что при указанных выше начальных параметрах скорость поверхностной рекомбинации S_{max} находится в диапазоне $10-10^4$ см/с. Проведено моделирование токовой чувствительности для HgCdTe p-типа, используя зависимость квантовой эффективности в приближении больших времен жизни τ_{n0} и больших диффузионных длин L_n неосновных носителей заряда с учетом влияния скорости поверхностной рекомбинации.

Ключевые слова: HgCdTe, инфракрасный (ИК) спектральный диапазон, гетероэпитаксиальные структуры, скорость поверхностной рекомбинации.

Введение

Начиная с фундаментальных работ Тамма [1], известно, что на поверхности структуры кристаллическая решетка обрывается, и в результате периодическое потенциальное поле кристалла изменяется. За счет оборванных поверхностных связей появляются «глубокие уровни» в запрещенной зоне полупроводника, аналогичные уровням в объеме, через которые могут рекомбинировать неравновесные носители заряда. Скорость рекомбинации через эти уровни поверхностной энергии описывается теорией Шокли-Рида-Холла (ШРХ, SRH), адаптированной для варианта поверхности.

Поверхность структуры на основе тройных растворов HgCdTe обычно пассивируется широкозонным слоем CdTe или оксидируется. При пассивации или оксидировании оборванные связи дополняются атомами пассивирующего или оксидирующего слоя, и плотность поверхностных состояний уменьшается. На реальных поверхностях полупроводниковых материалов ситуация дополнительно усложняется из-за поверхностных дефектов и внедрения примесей.

На рис. 1 показаны одномерное распределение потенциального поля кристаллической решетки и энергетический спектр электрона в периоди-

ческом поле кристалла ($x \geq 0$) и на его поверхности ($x < 0$).

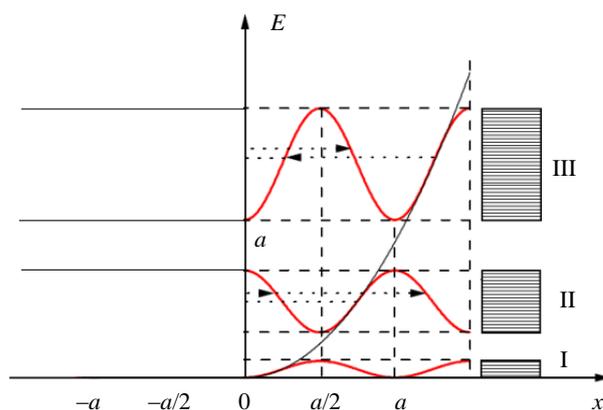


Рис. 1. Функция потенциальной энергии идеального одномерного кристалла и энергетического спектра электрона в периодическом потенциальном поле кристаллической решетки ($x \geq 0$) (I – нижняя зона электронов; II – валентная верхняя зона электронов; III – свободная зона электронов (зона проводимости); 1 – энергетический спектр свободного электрона; 2 – спектр электрона при взаимодействии с полем решетки) и на поверхности ($x < 0$).

На поверхности кристалла ($x = 0$) потенциальная энергия постоянна V_0 . При $x \geq 0$ функция потенциальной энергии соответствует уравнению $V(x+a) = V(x)$, т. е. в объеме кристалла имеется периодическое изменение потенциальной энергии с периодом $2a$, где a – постоянная кристаллической решетки. В приповерхностном слое структур HgCdTe проявляются различные виды зарядовых состояний, поэтому для расчета скорости поверхностной рекомбинации необходим анализ поверх-

Яковлева Наталья Ивановна, г.н.с. НИЦ, к.т.н.
АО «НПО «Орион».
Россия, 111538, Москва, ул. Косинская, 9.
Тел. 8(499) 374-81-30. E-mail: orion@orion-ir.ru

Статья поступила в редакцию 1 августа 2018 г.

© Яковлева Н. И., 2018

ностных зарядов и потенциала. Проведенные в работах (Nemirovsky Y., 1989, 1990, [2, 3]) исследования показали, что при толщине окисленного слоя порядка 0,07 мкм скорость поверхностной рекомбинации невелика, при этом в поверхностном окисленном слое плотность поверхностных состояний составляет менее $N_{ss} \sim 10^{11} - 10^{12} \text{ см}^{-2}$.

Целью данной работы являлось проведение расчетов скорости поверхностной рекомбинации для слоев HgCdTe *p*-типа проводимости при различных концентрациях легирующих примесей N_A и плотности поверхностных ловушек N_t . В процессе работы проведено моделирование токовой чувствительности для HgCdTe *p*-типа, используя зависимость квантовой эффективности в приближении больших времен жизни τ_{n0} и больших диффузионных длин L_n неосновных носителей заряда с учетом влияния скорости поверхностной рекомбинации на границах раздела.

Расчет скорости поверхностной рекомбинации и токовой чувствительности

Суммарная скорость поверхностной рекомбинации может быть вычислена с учетом теории ШРХ по формуле из работ [4, 5], а именно:

$$S = \frac{U_z}{\Delta p} = \frac{(n_0 + p_0)}{\frac{n_0 + n_s}{S_p} + \frac{p_0 + p_s}{S_n}},$$

где U_z – скорость рекомбинации; Δp – изменение концентрации носителей заряда вследствие внешнего воздействия; n_0 , и p_0 – равновесные концентрации электронов и дырок в объеме слоя HgCdTe; S_n и S_p – скорости поверхностной рекомбинации для электронов и дырок; n_s и p_s – концентрации захваченных на поверхностные ловушки электронов и дырок.

Скорость поверхностной рекомбинации для дырок и электронов определяются как

$$S_p = \sigma_p v_p N_t, \quad S_n = \sigma_n v_n N_t,$$

где σ_n , σ_p – площади центров захвата электронов и дырок v_n , v_p – эффективные тепловые скорости электронов и дырок в слое HgCdTe; для элект-

тронов скорость равна $v_n = \sqrt{3k_B T / m_e^*}$, для дырок $v_p = \sqrt{3k_B T / m_p^*}$, N_t – плотность поверхностных ловушек.

Суммарную скорость поверхностной рекомбинации можно представить, используя вышеперечисленные параметры в виде выражения:

$$S = \frac{\sigma_n v_n \sigma_p v_p N_t (n_0 + p_0)}{\sigma_n v_n (n_0 + n_s) + \sigma_p v_p (p_0 + p_s)}.$$

Если предположить, что разрешенные уровни энергии расположены примерно в центре запрещенной зоны, можно провести расчет концентраций захваченных на ловушки электронов n_s и дырок p_s в соответствии с формулами:

$$n_s = n_i \exp\left(\frac{eV_s}{k_B T}\right) \quad p_s = n_i \exp\left(-\frac{eV_s}{k_B T}\right),$$

где V_s – максимальный потенциал на поверхности полупроводника.

Расчет скорости поверхностной рекомбинации для материала HgCdTe *p*-типа проводимости состава $x = 0,22$ мол. дол. проведем, исходя из следующих начальных данных: концентрация поверхностных ловушек $N_t = 10^{12} \text{ см}^{-2}$, разница между энергиями собственного уровня Ферми и уровня ловушек в запрещенной зоне $E_i - E_t = 0,021 \text{ эВ}$; площадь сечения захвата электронов $\sigma_n = 10^{15} \text{ см}^2$; площадь сечения захвата дырок $\sigma_p = 10^{14} \text{ см}^2$; тепловая скорость электронов – 10^7 см/с ; тепловая скорость дырок – 10^6 см/с .

На рис. 2 для материала HgCdTe *p*-типа проводимости состава $x = 0,22$ мол. дол. представлены зависимости скорости поверхностной рекомбинации от обратной температуры при различных значениях объемной концентрации легирующей примеси: $N_A = 10^{14}$; 10^{16} ; 10^{17} см^{-3} . Показано, что при указанных выше начальных параметрах скорость поверхностной рекомбинации S_{\max} находится в диапазоне $10 - 10^4 \text{ см/с}$.

Зависимость скорости поверхностной рекомбинации от плотности поверхностных ловушек (N_t) для материала *p*-типа проводимости состава $x = 0,22$ мол. дол. с уровнем легирования $N_A = 10^{14} \text{ см}^{-3}$ при температуре $T = 80 \text{ К}$ представлена на рис. 3.

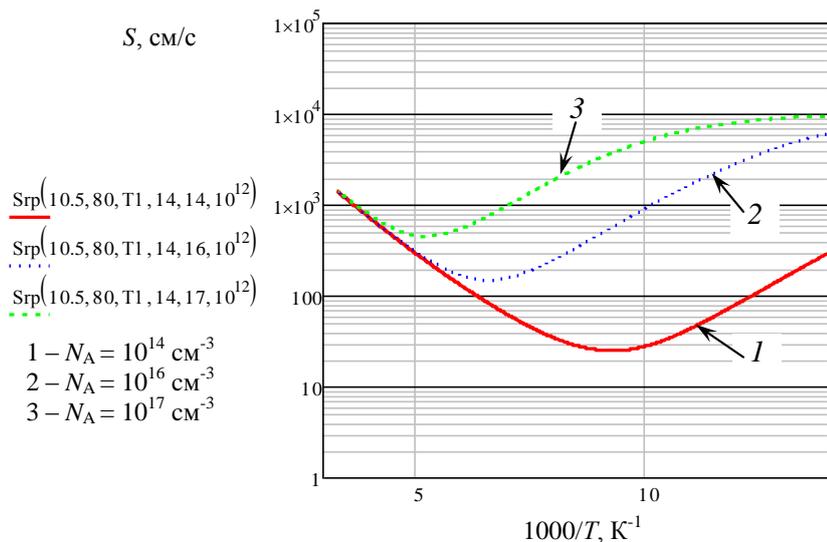


Рис. 2. Зависимости скорости поверхностной рекомбинации от обратной температуры для материала HgCdTe p-типа проводимости состава $x = 0,22$ мол. дол. при различных значениях концентрации легирующей примеси в объеме полупроводника: $N_A = 10^{14}; 10^{16}; 10^{17} \text{ см}^{-3}$.

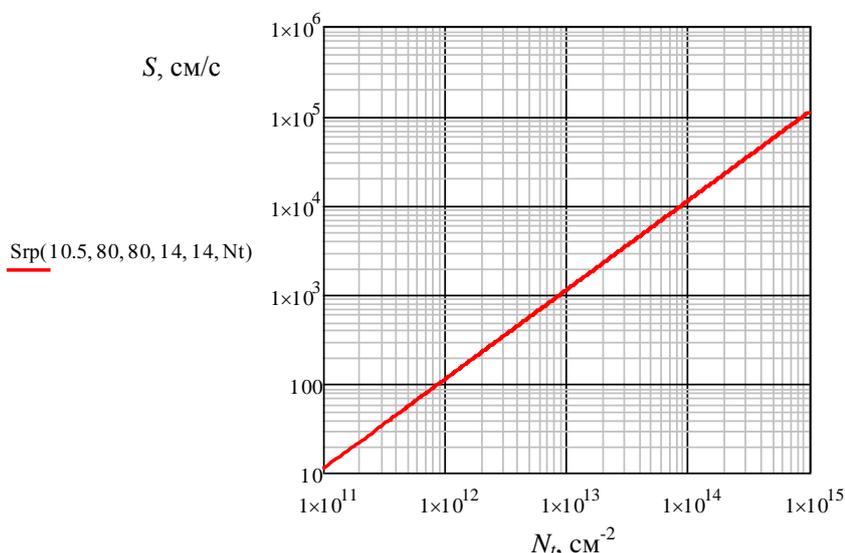


Рис. 3. Зависимость скорости поверхностной рекомбинации от плотности поверхностных ловушек (N_t) для материала HgCdTe p-типа проводимости состава $x = 0,22$ мол. дол. при объемной концентрации носителей заряда $N_A = 10^{14} \text{ см}^{-3}$ и температуре $T = 80 \text{ К}$.

Из рисунка видно, что скорость поверхностной рекомбинации существенно зависит от плотности поверхностных ловушек, так при $N_t \approx 10^{12} \text{ см}^{-2}$ скорость поверхностной рекомбинации составляет $S_{rp} \approx 100 \text{ см/с}$, в то время как при $N_t \approx 10^{14} \text{ см}^{-2}$ она возрастает до $S_{rp} \approx 10^4 \text{ см/с}$.

Во время пассивации поверхностей структур на основе $\text{Hg}_{1-x}\text{Cd}_x\text{Te}$ при изготовлении фотоприемных устройств (ФПУ) формируются слои, аккумулирующие поверхностные заряды. Данные слои уменьшают скорость поверхностной рекомбинации и, таким образом, улучшают выходные параметры. Однако, с другой стороны, приповерхностные области могут обладать высокой проводимостью, что уменьшает дифференциальное сопротивление базового слоя, в результате чувствительность и обнаружительная способность ухудшаются. Поэтому защита поверхности структур HgCdTe, направленная на улучшение выход-

ных характеристик прибора, это разумный компромисс между возможностью уменьшения скорости поверхностной рекомбинации и сохранением высоких значений дифференциального сопротивления базовой области.

Оценку токовой чувствительности фотодиода R_i при воздействии монохроматического излучения с длиной волны λ проведем с учетом поверхностной рекомбинации для материала p-типа проводимости состава $x = 0,22$ мол. дол. Определим токовую чувствительность по формуле из работы [6]:

$$R_i = \frac{\lambda}{hc} \eta q,$$

где c – скорость света, h – постоянная Планка, η – квантовая эффективность, λ – длина волны, q – заряд электрона.

Для расчета токовой чувствительности используем зависимость квантовой эффективности фотодиода, облученного со стороны подложки. Для простоты рассмотрим случай больших времен жизни неосновных носителей заряда τ_{n0} при больших диффузионных длинах L_n . Тогда для материала p -типа проводимости значение квантовой эффективности η_p вычисляется по формуле из работы [7]:

$$\eta_p = \frac{s(1 - e^{-\alpha x_p}) + \alpha D_n}{\alpha(D_n + s_{rp}x_p)} e^{-\alpha x_p} \quad (L_n \rightarrow \infty),$$

где s_{rp} – скорость рекомбинации неравновесных электронов на поверхности p -слоя, x_p – ширина обедненной области в материале p -типа; D_n – ко-

эффициент диффузии электронов; α – коэффициент поглощения.

Значение токовой чувствительности можно рассчитать по известной зависимости, подставляя в нее выражение квантовой эффективности:

$$R_i = \frac{\lambda}{hc} \left[\frac{s_{rp}(1 - e^{-\alpha x_p}) + \alpha D_n}{\alpha(D_n + s_{rp}x_p)} - e^{-\alpha x_p} \right] q.$$

Токовая чувствительность при различных значениях плотности поверхностных ловушек для материала КРТ p -типа проводимости показана на рис. 4. Очевидно, что при плотности поверхностных ловушек более 10^{13} см^{-2} (скорость поверхностной рекомбинации $\sim 10^3 \text{ см/с}$) токовая чувствительность начинает уменьшаться и характеристики прибора деградируют.

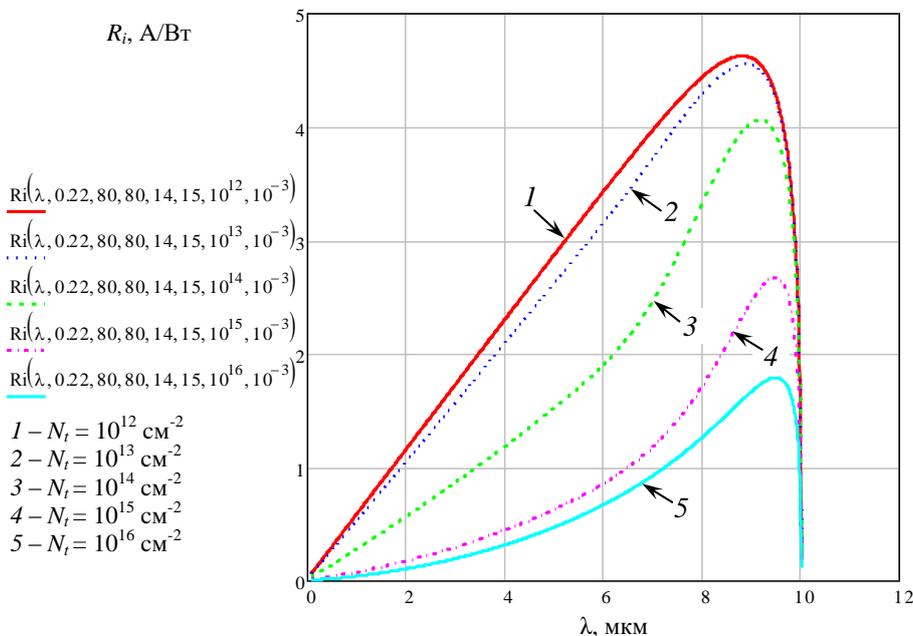


Рис. 4. Зависимость токовой чувствительности от длины волны для материала HgCdTe p -типа проводимости при различных значениях плотности поверхностных ловушек: $N_t = 10^{12}; 10^{13}; 10^{14}; 10^{15}; 10^{16} \text{ см}^{-2}$.

Выбирая технологию пассивации, можно контролировать эффективную скорость рекомбинации поверхности, а, следовательно, характеристики прибора. Плотность поверхностных состояний при толщине приповерхностного донорного слоя $d = 100 \text{ нм}$ составляет порядка $N_{ss} = 10^9 \text{ см}^{-2}$, что позволяет при скорости поверхностной рекомбинации 10^2 см/с и менее обеспечить высокие фотоэлектрические параметры фотодиодов на основе КРТ.

Заключение

Параметры фотодиодов на основе HgCdTe определяются не только свойствами материала, но

и также плотностью поверхностных состояний, связанных с технологией выращивания и изготовления. Важность пассивации поверхности базового слоя известна достаточно давно (Kinch M. A. 1981 [8], Nemirovsky Y., 1994, [9]). Основные технологические трудности связаны с возникновением нежелательного приповерхностного инверсного слоя. Наличие фиксированного положительного заряда приводит к возникновению приповерхностного отрицательного слоя, снижению сопротивления базовой области и уменьшению основных параметров. Наличие фиксированного отрицательного заряда приводит к возникновению приповерхностного положительного слоя, который вытягивает неосновные электроны из области поглощения p -типа к поверхности, что уменьшает

их вклад в фотопроводимость вследствие поверхностной рекомбинации. Технология пассивации поверхности базового слоя структуры должна обеспечивать плотность поверхностных состояний $\sim 10^9 \text{ см}^{-2}$, что позволяет сохранить основные характеристики прибора на высоком уровне.

ЛИТЕРАТУРА

1. Tamm I. E. // Phys. Z. Soviet Union. 1932. Vol. 1. P. 733.
2. Nemirovsky Y. // Journal of Vacuum Science and Technology. 1990. Vol. A8. P. 1185
3. Nemirovsky Y., Bahir G. // J. Vac Sci Technol. 1989. Vol. A 7. P. 450.

4. Hall R. N. // Phys. Rev. 1952. Vol. 87. P. 387.
5. Shockley W., Read W. T. // Phys. Rev. 1952. Vol. 87. P. 835.
6. Sze S. M. Physics of Semiconductor Devices. – Published by John Wiley & Sons, Inc., Hoboken, New Jersey. 2007.
7. Van De Wiele F. Quantum Efficiency of Photodiode, in Solid State Imaging, eds. P. G. Jespers, F. Van De Wiele, and M. H. White, p.p. 41–76 – Noordhoff, Leyden, The Netherlands, 1976.
8. Kinch M. A. In Book: Semiconductor and Semimetal, Vol. 18. P. 287. Eds. Willardson R. K, Beer A.C. – Academic, New York, 1981.
9. Nemirovsky Y., Mainzer N., Weiss E. Passivation of HgCdTe. In Book: Properties of Narrow Gap Cadmium-Based Compounds, EMIS Datareviews Series No. 10, P. 284–90. Ed. P. P. Capper - IEE, London, 1994.

PACS: 42.79.Pw, 85.60.Gz, 07.57.Kp, 85.60.Dw

Effect of surface recombination to the HgCdTe FPA performances

N. I. Iakovleva

Orion R&P Association
9 Kosinskaya str., Moscow, 111538, Russia
E-mail: orion@orion-ir.ru

Received August 1, 2018

The surface recombination rate of HgCdTe p-type layers have been calculated for various doping impurity concentrations and surface-state densities. It is shown that, the maximum value of surface recombination rate S_{max} was in the range of $10-10^4 \text{ cm/s}$. Modeling of the current sensitivity HgCdTe photodiode has been carried out using the dependence of quantum efficiency on the approximation of long lifetimes τ_{n0} and large diffusion lengths L_n of minority carriers. The effect of surface recombination to HgCdTe FPA performance have been estimated.

Keywords: HgCdTe, infrared (IR) spectral region, heteroepitaxial structure, photodiode array, Focal Plane Array (FPA), surface recombination rate.

REFERENCES

1. I. E. Tamm, Phys. Z. Soviet Union **1**, 733 (1932).
2. Y. Nemirovsky, Journal of Vacuum Science and Technology **A8**, 1185 (1990).
3. Y. Nemirovsky and G. Bahir, J. Vac Sci Technol. **A 7**, 450 (1989).
4. R. N. Hall, Phys. Rev. **87**, 387 (1952).
5. W. Shockley and W. T. Read, Phys. Rev. **87**, 835 (1952).
6. S. M. Sze, *Physics of Semiconductor Devices* (Published by John Wiley & Sons, Inc., Hoboken, New Jersey. 2007).
7. F. Van De Wiele, *Quantum Efficiency of Photodiode*, in Book: *Solid State Imaging*, eds. P. G. Jespers, F. Van De Wiele, and M. H. White, (Noordhoff, Leyden, The Netherlands, 1976).
8. M. A. Kinch, In Book: *Semiconductor and Semimetal*, Vol. 18. P. 287. Eds. R. K. Willardson and A. C. Beer (Academic, New York, 1981).
9. Y. Nemirovsky, N. Mainzer, and E. Weiss, Passivation of HgCdTe, in Book: *Properties of Narrow Gap Cadmium-Based Compounds*, EMIS Datareviews Series No. 10, P. 284–90, ed. P. P. Capper, (IEE, London, 1994).