

06;12

Влияние растекания заряда вдоль поверхности полупроводника на характер коэффициента умножения в структуре кремний–широкозонный слой

© З.Я. Садыгов, Т.В. Жежер

Объединенный институт ядерных исследований, Дубна

Поступило в Редакцию 11 декабря 1996 г.

В работе показано, что процесс растекания подвижных неосновных носителей заряда вдоль границы раздела полупроводник–широкозонный слой существенно влияет на однородность коэффициента умножения лавинного фотоприемника, причем вокруг неоднородностей полупроводниковой подложки формируется значительная по площади "мертвая зона", где коэффициент умножения на несколько порядков меньше, чем на остальной площади прибора. Предложены конкретные способы улучшения однородности лавинного процесса в структуре типа полупроводник–широкозонный слой.

В последние годы широко обсуждается возможность создания нового типа лавинных фотоприемников на основе кремниевых гетероструктур. В качестве широкозонного слоя обычно используют слои SiO_2 [1–3], SiC [4], [5] и другие материалы с величиной запрещенной зоны большей, чем у кремния. В кремниевых гетероструктурах локальное увеличение лавинного тока приводит к увеличению накопленного на границе полупроводник–широкозонный слой подвижного заряда, экранирующего электрическое поле в области полупроводника с пониженным потенциалом пробоя. Таким образом, осуществляется отрицательная обратная связь между коэффициентом умножения лавинного процесса и падением напряжения в полупроводнике.

Однако неравномерное распределение плотности поверхностных подвижных зарядов приводит к появлению продольных электрических полей, вызывающих растекание этих подвижных зарядов вдоль границы полупроводник–широкозонный слой. В данной работе исследовано влияние растекания заряда на коэффициент умножения в кремниевых гетероструктурах при различных сопротивлениях широкозонного слоя.

Рассмотрим кремниевую гетероструктуру, в которой осуществляется лавинное умножение заряда под действием приложенного напряжения. Под генерацией будем подразумевать лавинное умножение носителей зарядов, а под рекомбинацией — их уход в контакты через широкозонный слой. При определенных условиях скорость генерации носителей заряда в полупроводнике превышает их рекомбинацию, в результате чего на границе полупроводник–широкозонный слой накапливаются неосновные носители заряда, экранирующие электрическое поле в лавинной области полупроводника.

Уравнение растекания заряда может быть получено из известного уравнения непрерывности полного тока в обедненном слое полупроводника [6]. Проинтегрировав упомянутое уравнение непрерывности по толщине инверсионного слоя в предположении отсутствия диффузионной составляющей тока, получим следующее уравнение растекания заряда:

$$I_a - I_0 - \nabla_s I_s = \frac{\partial \sigma}{\partial t},$$

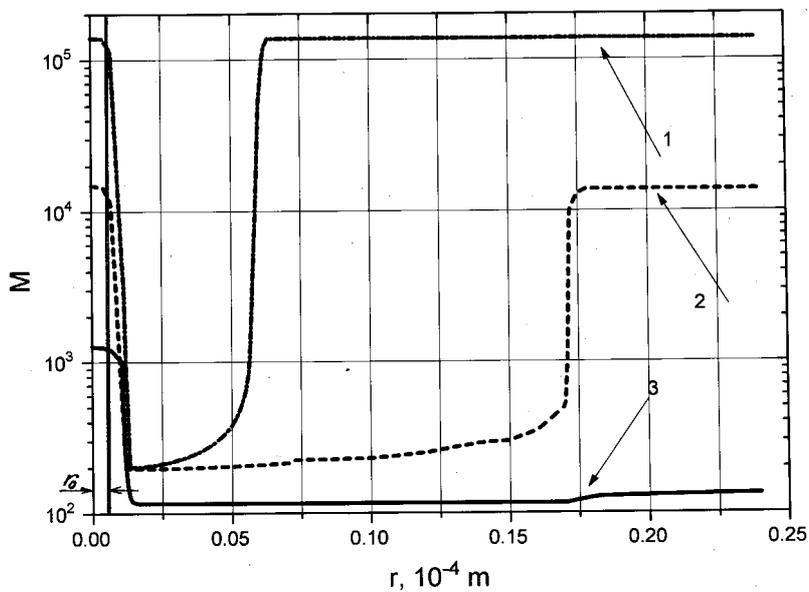
$$I_s = -\mu \sigma \nabla_s \psi_s, \quad (1)$$

где $\sigma = \int_0^\delta \rho(x, y, z) dz$ — поверхностная плотность заряда, $I_s = \int_0^\delta J(x, y, z) dz$ — компонента тока вдоль поверхности, I_a — лавинный ток в полупроводнике, I_0 — ток утечки широкозонного слоя, ∇_s — оператор градиента вдоль поверхности. Лавинный ток I_a в фотоприемнике определяется известной формулой Миллера [7], связывающей коэффициент умножения M носителей заряда с поверхностным потенциалом полупроводника, а ток утечки I_0 можно определить, предположив, для простоты, чисто омический характер проводимости широкозонного слоя. Таким образом, имеем:

$$I_a = i_a M = \frac{i_a}{1 - (\psi_s / \psi_0)^m},$$

$$I_0 = \frac{V_0}{R_0}, \quad (2)$$

где i_a — инициирующий лавину ток, ψ_0 — потенциал пробоя поверхности полупроводника, m — эмпирический параметр, принимающий значения от 1 до 5, R_0 — сопротивление широкозонного слоя единичной площади.



Зависимость коэффициента умножения от координаты на поверхности лавинной структуры кремний-широкозонный слой при $V = 53.8$ В, $r_0 = 10$ мкм, $N = 1.5 \cdot 10^{16}$ см $^{-3}$, $d = 0.1$ мкм, $m = 2$, $i_a = 10^{-3}$ А/м 2 , $\mu = 0.05$ м 2 /с · В 2 , $\Psi_{01} = 39.9$ В, $\Psi_{02} = 40.0$ В. 1 — $R_0 = 0.1$ Ом·м; 2 — $R_0 = 1$ Ом·м; 3 — $R_0 = 50$ Ом·м.

Используя известное решение уравнения Пуассона, для структуры полупроводник-широкозонный слой можно получить следующую связь между поверхностным потенциалом и плотностью поверхностного подвижного заряда [7]:

$$\psi_s = u_0 + \left(V - \frac{\sigma}{C} \right) - \sqrt{u_0 \left[2 \left(V - \frac{\sigma}{C} \right) + U_0 \right]}, \quad (3)$$

где $u_0 = \frac{\varepsilon q N}{C^2}$, q — заряд электрона, N — концентрация примесей в полупроводнике, C — удельная емкость широкозонного слоя.

Теперь предположим, что на поверхности подложки фотоприемника содержится единственная область с радиусом r_0 , внутри которой потенциал пробоя понижен по сравнению с остальной частью прибора. Начало

координат поместим в центр круга радиусом r_0 , причем, $\psi_0 = \psi_{01}$ при $r \leq r_0$, а $\psi_0 = \psi_{02} > \psi_{01}$ при $r > r_0$. Учитывая симметрию задачи, будем использовать полярные координаты. При этом из уравнений (1), (2) и (3) в стационарных условиях можно получить следующие уравнения для поверхностного потенциала:

$$\frac{I}{r} \frac{\partial}{\partial r}(rI_s) = \frac{i_a}{1 - (\psi_s/\psi_0)^m} - \frac{V - \psi_s}{R_0},$$

$$I_s = -\mu C \left(V - \psi_s - \sqrt{2u_0\psi_s} \right) \frac{\partial \psi_s}{\partial r}. \quad (4)$$

Решение уравнения (4) с учетом выражения (2) позволяет изучить поведение коэффициента умножения вдоль поверхности лавинного фотоприемника. На рисунке представлены результаты расчета коэффициента умножения лавинного процесса в зависимости от координаты на плоскости лавинного фотоприемника. Видно, что коэффициенты умножения лавинного процесса внутри круга с радиусом r_0 и на большом расстоянии от этого круга имеют почти одинаковые значения, несмотря на разные значения коэффициента пробоя в этих областях. Это достигается благодаря накоплению в области с радиусом r_0 подвижного заряда, экранирующего электрическое поле в этой области полупроводника. Однако растекание этого заряда за пределы области с радиусом r_0 приводит к "подавлению" там лавинного процесса. Влияние подвижного заряда распространяется до такого расстояния, на котором подвижные заряды успевают полностью уходить в контакты через широкозонный слой. Как видно из рисунка, размер области, где коэффициент умножения значительно уменьшен за счет растекания заряда, зависит от сопротивления широкозонного слоя. Например, при сопротивлении широкозонного слоя $R_0 = 50 \text{ Ом} \cdot \text{м}^2$, что соответствует удельному сопротивлению $5 \cdot 10^{10} \text{ Ом} \cdot \text{см}$ при $d = 0.1 \text{ мкм}$, радиус области фотоприемника с пониженным коэффициентом умножения превышает 500 мкм .

Таким образом, для получения однородного коэффициента умножения по всей рабочей площади прибора следует принимать меры, предотвращающие растекание заряда вдоль границы раздела полупроводник–широкозонный слой. Одним из способов предотвращения растекания является формирование на поверхности полупроводника отдельных p – n -переходов размером 2 – 3 мкм и интервалом между ними 5 мкм . Результаты экспериментов, представленные в работе [8], показывают, что разброс коэффициента умножения сигнала в таком фотоприемнике не превышает 10% при его среднем значении $M = 5 \cdot 10^3$.

Список литературы

- [1] *Goetzberger A., Nicolian E.H.* // Appl. Phys. Lett. 1966. V. 9. N 12. P. 444–446.
- [2] *Кравченко А.Б.* и др. // Квантовая электроника. 1981. Т. 8. N 4. С. 785–792.
- [3] *Вуль А.Я.* и др. // Письма в ЖТФ. 1988. Т. 14. В. 19. С. 1729–1732.
- [4] *Гасанов А.Г.* и др. // Письма в ЖТФ. 1988. Т. 14. В. 8. С. 706–709.
- [5] *Sadygov Z.Y.* et al. // Appl. Surface Science. 1995. V. 92. P. 575–578.
- [6] *Поспелов В.В.* и др. // Микроэлектроника. 1974. Т. 3. В. 6. С. 475–481.
- [7] *Зи С.М.* Физика полупроводниковых приборов. М.: Энергия, 1973. 655 с.
- [8] *Sadygov Z.Y.* et al. // IEEE Trans. Nucl. Sci. 1996. V. 43. N 3. P. 1009–1013.