

Г.Г. КИРАКОСЯН, Г.А. МАКАРЯН, А.В. ПЕТРОСЯН

ИССЛЕДОВАНИЕ ЭФФЕКТИВНОГО ТЕМПА РЕКОМБИНАЦИИ В ТРАНЗИСТОРЕ С ПОЛИКРЕМНИЕВЫМ ЭМИТТЕРОМ

Разработан метод, учитывающий влияние границы раздела на ток неосновных носителей. Получена формула, позволяющая рассчитать рекуррентно эффективный темп рекомбинации (ЭТР) на границе кремний-поликремний в зависимости от количества зерен.

Ключевые слова: поликремний, эффективный темп рекомбинации, зерно, граница зерен, граница раздела, блочная модель.

Введение. В последнее время слои поликремния Si* стали широко применяться при изготовлении быстродействующих силовых многоэмиттерных транзисторов в качестве резисторов и источников диффузии для создания активных областей приборов. Коэффициент усиления транзисторов с поликремниевым эмиттером намного превышает коэффициент усиления обычных транзисторов (7-10 раз) [1]. В [2-3] предложено характеризовать поведение неосновных носителей в поликремнии эффективной подвижностью и константой времени жизни, что приводит к уменьшению скорости поверхностной рекомбинации по сравнению с монокристаллическим эмиттером. В этих работах принимается, что подвижность неосновных носителей заряда равна подвижности основных. Однако теоретический анализ показывает, что это не так [4]. Кроме того, в аналитическом приближении [2] влияние границы раздела поликремний-кремний не учитывается при расчете эффективной поверхностной скорости рекомбинации, поэтому последний параметр не используется при анализе прибора.

В настоящей работе разработан метод, позволяющий учитывать влияние границы раздела на ток неосновных носителей при низких и средних смещениях, используя концепцию об эффективном темпе поверхностной рекомбинации.

Блочный анализ поликремниевых зерен и границ зерен. Известно, что поликремний состоит из монокристаллических зерен и разупорядоченных границ зерен [5-6]. В транзисторах с высоколегированным поликремниевым эмиттером внутри зерен существует встроенное электрическое поле, обусловленное потенциальным барьером, образованным вследствие захвата основных носителей [5]. Если количество инжектированных в зерна неосновных носителей заряда намного меньше, чем основных (низкий и средний уровень инжекции), то влияние этого поля на движение неосновных носителей заряда ничтожно мало. В таких условиях неосновные носители перемещаются как незаряженные частицы, т.е. только за счет диффузии. Поэтому при решении уравнения непрерывности не учитывается дрейфовая компонента тока. Применяя уравнение диффузии к каждому зерну, токи на границах зерна можно

представить как линейную функцию от концентраций избыточных неосновных носителей на тех же границах зерна:

$$j_1 = q(a_g p_1 - b_g p_2), \quad j_2 = q(b_g p_1 - a_g p_2), \quad (1)$$

где

$$a_g = \frac{D_p}{L_p} \coth \frac{d_g}{L_p}, \quad b_g = \frac{D_p}{L_p} \operatorname{csc} h \frac{d_g}{L_p}, \quad (2)$$

$\delta p(0)=p_1$, $\delta p(d_g)=p_2$ - концентрации избыточных неосновных носителей на границах зерна; D_p , L_p - коэффициент диффузии и диффузионная длина дырок внутри зерен соответственно, которые имеют то же значение, что и в монокристаллическом кремнии; d_g - размер зерна.

В вышеприведенных уравнениях учитывается рекомбинация носителей внутри зерен. Вблизи границы зерна происходит дополнительное рассеяние на деформациях решетки, а на границе - рекомбинация на ловушечных уровнях. Обычная модель границы зерен пренебрегает ее толщиной и предполагает, что концентрация носителей не изменяется вдоль границы, т.е. рекомбинация происходит в бесконечно тонком слое [3]. Полное уменьшение подвижности в поликремнии объясняется наличием потенциального барьера на границе. Однако эта модель является ограниченной и не объясняет уменьшение подвижности неосновных носителей. Здесь используется модель, предложенная в [7], где предполагается, что подвижность на границе зерен отличается от подвижности в зерне. Далее полное уменьшение подвижности приписывается меньшему значению подвижности μ_{gb} на границе зерна с конечной толщиной. Что касается рекомбинации, обусловленной энергетическими состояниями в запрещенной зоне границы зерен, то можно определить среднее время жизни или предположить, что рекомбинация происходит только на границе раздела, используя скорость рекомбинации S_{gb} . Таким образом, принимается, что граница зерен для исследования подвижности носителей имеет конечную толщину, а для расчета скорости рекомбинации является бесконечно тонкой, т.е. модельными параметрами являются μ_{gb} и S_{gb} . С другой стороны, эта интерпретация является результатом линейного соотношения между плотностью тока и концентрацией избыточных носителей на границе раздела

$$j_{gb} = qT_{gb}(p_2 - p_3), \quad T_{gb} = \frac{kT}{q} \frac{\mu_{gb}}{w}, \quad (3)$$

где w - ширина границы зерен, а μ_{gb} - подвижность дырок на границе зерен, которая называется подвижностью делокализованного состояния и принимает значение $\mu_{gb} = 2 \text{ см}^2 / \text{Вс}$ [7].

Скорость рекомбинации S_{gb} вблизи края границы зерен определяется следующим образом:

$$j_2 - j_{gb} = qS_{gb}p_2, \quad j_{gb} - j_3 = qS_{gb}p_3. \quad (4)$$

Пренебрегая зависимостью темпа рекомбинации от уровня Ферми, для S_{gb} получим простое выражение

$$S_{gb} = \frac{N_{st}}{2} c_p v_{th}, \quad (5)$$

где концентрация примесных центров на границе зерен разделяется на две равные части и распределяется по краям границы зерен; c_p - сечение захвата для дырок; v_{th} - средняя тепловая скорость свободной дырки при данной температуре.

Подставляя первую формулу (3) в (4), получим

$$j_2 = q(a_{gb}p_2 - b_{gb}p_3), \quad j_3 = q(b_{gb}p_2 - a_{gb}p_3), \quad (6)$$

где

$$a_{gb} = S_{gb} + T_{gb}, \quad b_{gb} = T_{gb}. \quad (7)$$

Как видно из (1) и (7), существует аналогичное линейное соотношение между выходными токами и концентрациями носителей для краев границ зерен и самих зерен, хотя в области зерна зависимость $p(x)$ имеет гиперболический вид, тогда как на границе $p(x)$ является линейной. Это делает концепцию эффективного темпа рекомбинации (ЭТР) более корректной, так как ток на зернах и их границах пропорционален концентрации избыточных носителей в этих же точках. Фактически, пока электрическое поле и физические параметры D_p, τ_p являются функциями только профиля легирования (случай низкого уровня инжекции), для неосновных носителей это линейное соотношение выполняется. В дальнейшем назовем эту модель "блочной", тем самым указывая, что рассматриваются только выходные токи и концентрации носителей.

Предположим, что внутри поликремниевого слоя имеется N одинаковых зерен с известным размером, а ЭТР на контакте Si^* -металл $S_M \approx 10^6$ см/с (см. рис.).

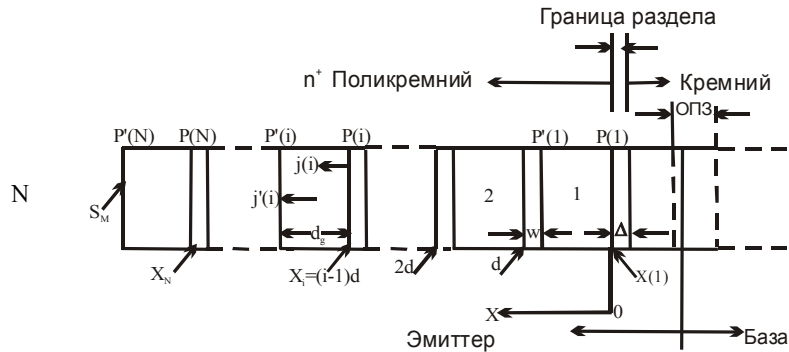


Рис. Схематическая диаграмма транзистора с поликремниевым эмиттером

На рис. используется следующая запись для токов:

$$j(i) = j(x_i), \quad j'(i) = j(x_i + d_g),$$

где $x_i = (i-1)d$, $d = d_g + w$ - полная длина зерна, а $i = 1, 2, \dots, N$.

Из уравнений (1) и (7) получим трехдиагональную систему $2N-1$ линейных уравнений. Неизвестными параметрами являются концентрации избыточных неосновных носителей $p'(1), p(i), p'(i) (i = 2, \dots, N)$ на краях зерен, любая из которых является линейной функцией от $p(1)$. Последняя представляет собой концентрацию инжектированных носителей в поликремнии вблизи границы раздела поликремний-кремний. Таким образом, выражение для $p(1)$ можно записать в виде

$$p'(1) = Ap(1), \quad A = b_g / (a_g + S_{\text{eff}}).$$

Здесь S_{eff} - ЭТР на границе первого зерна.

Подставив вышеприведенные уравнения в первую формулу (1), получим выражение для инжекционного тока

$$j(1) = q[a_g p(1) - b_g p'(1)] = qS_{p'} p(1),$$

где

$$S_{p'} = a_g - \frac{b_g^2}{a_g + S_{\text{eff}}} = V_d \frac{V_d + S_{\text{eff}} \coth(d_g / L_g)}{V_d \coth(d_g / L_g) + S_{\text{eff}}}, \quad (8)$$

$V_d = D_p / L_p$ - диффузионная скорость.

Линейное соотношение между током и концентрацией в одинаковых точках позволяет определить ЭТР $S_{p'}$, который характеризует влияние поликремниевого слоя на поведение инжектированных неосновных носителей в эмиттере. Т. е. действие поликремниевого контакта заключается в том, что ЭТР S_M преобразуется в ЭТР $S_{p'}$. Если $S_{p'}$ меньше чем S_M , то доминирует блокирующее действие поликремния, обусловленное малыми значениями μ_{gb} , что приводит к увеличению коэффициента усиления. В противном случае, дополнительная рекомбинация вблизи границы зерен превалирует над понижением подвижности, что не позволяет получить приемлемые значения коэффициента усиления.

Цель работы - определить $S_{p'}$, зная физическую структуру поликремниевого слоя, даже в случае, когда размеры зерен неодинаковы. Задаваемыми геометрическими параметрами являются количество зерен, его размер и ширина границы. Физическими параметрами являются подвижность и время жизни неосновных носителей заряда внутри зерен μ_g, τ_g , а также μ_{gb}, N_{st} на границе зерен.

Например, при $N=1$ (одно зерно)

$$S_{p'} = a_g - b_g^2 / (a_g + S_M), \quad (9)$$

при $N = 2$ (два зерна и одна граница зерен)

$$S_{p'} = a_g - b_g^2 / (a_g + S_{\text{eff}}), \quad (10)$$

где

$$S_{\text{eff}} = T_{\text{gb}} + S_{\text{gb}} - \frac{T_{\text{gb}}^2}{a_g + T_{\text{gb}} + S_{\text{gb}} - b_g^2 / (a_g + S_M)}.$$

На самом деле, нет необходимости одновременно решить полную систему линейных уравнений, чтобы получить значение $S_{p'}$. Применяя формулы (10) и используя соответствующие значения для S_M, a_g, b_g на блоках, можно легко получить $S_{p'}$. Заметим, что блок здесь относится как к зерну, так и к границе зерен.

Влияние поликремниевого слоя на ЭТР учитывается с помощью формул (9), (10) так же хорошо, как и с последующими членами с N-м количеством зерен, большим чем 2. Два конкурирующих фактора изменяют $S_{p'}$ в разных направлениях. Дополнительная рекомбинация на границах зерен увеличивает полный рекомбинационный ток, в результате которого повышается $S_{p'}$, тогда как малое значение подвижности вблизи границ зерен уменьшает крутизну распределения инжектированных неосновных носителей в соседнем слое монокристаллического эмиттера [8], в результате чего уменьшается $S_{p'}$. В случае, если превалирует последний эффект, увеличение количества зерен приводит к уменьшению $S_{p'}$, либо при фиксированном размере зерна d_g , либо при фиксированной полной толщине L_t поликремниевого слоя. Если рекомбинационный эффект (обусловленный большим поперечным сечением захвата c_p) превосходит эффект понижения подвижности, то увеличение количества зерен может только ухудшить характеристики транзистора с помощью увеличения $S_{p'}$. Этот вывод отличается от предыдущих результатов [3], где увеличение количества зерен всегда приводит к уменьшению ЭТР.

Таким образом, применение поликремневых эмиттеров позволяет существенно уменьшить ток инжекции из базы в эмиттер и, следовательно, увеличить статический коэффициент усиления по току. Этот эффект обуславливается процессами как в самом поликремнии, так и на границе раздела $\text{Si}^* - \text{Si}$. В заключение отметим, что разработанный новый метод получен в приближении малой толщины (промежуточного квазиокисного слоя SiO_x).

Работа выполнена в рамках проекта МНТЦ А-140-2.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **De Graaff H.C. and De Groot J. G.** The SIS tunnel emitter: A theory for emitters with thin interface layers // IEEE Trans. Electron Devices. – 1979. – V. ED – 26, 1 8.- P. 1771-1776.
2. **Fossum J.G. and Shibib M.A.** A minority-carrier transport model for polysilicon contacts to silicon bipolar devices, including solar cells // IEDM Tech. Dig.-1980.-P. 280-283.
3. **Eltoukhy A.A. and Roulston D.J.** Minority-carrier injection into polysilicon emitters// IEEE Trans. Electron Devices-1982.-V. ED-29, 1 4.-P. 961-964.
4. **Bennet H.S.** Hole and electron mobilities in heavily doped silicon: comparison of theory and experiment // Solid State Electr.-1983.-V. 26, 1 12.- P. 1157-1166.
5. **Lu N.C.C.,Gertzberg L.,Lu C.Y.,Meindl J.D.** A new conduction model for polycrystalline silicon films // IEEE Electron Device Lett.-1981. - V. EDL - 2, 1 3.- P. 95-98.
6. **Киракосян Г.Г., Амбарян А.Р., Шабоян А.С.** Влияние изолированной границы зерен на диффузионные параметры р-п переходов // Мат. 1-й Нац. конф. “Полупроводниковая микроэлектроника”, 21 мая 1997г. - С. 129-132.
7. **Zhao J., Li G.P., Liao K.Y., Chin M.R., Sun J.Y.** Observation of electromigration of hydrogen in polycrystalline silicon using poly emitter bipolar transistors // Appl.Phys.Lett.-1993.- V. 62, 1 23. - P. 2950-2952.
8. **Бубенников А.Н., Садовников А.Д.** Физико-технологическое проектирование биполярных элементов кремниевых БИС. – М.: Радио и связь,1991.-287с.

ГИУА, ЗАО “Виасфер Технопарк”. Материал поступил в редакцию 20.02.2000.

Գ.Հ. ԿԻՐԱԿՈՍՅԱՆ, Գ.Ա. ՄԱԿԱՐՅԱՆ, Ա.Վ.ՊԵՏՐՈՍՅԱՆ

**ՎԵՐԱՄԻԱՎՈՐՄԱՆ ԱՐՁՅՈՒՆԱՐԱՐ ԱՐԱԳՈՒԹՅԱՆ ՀԵՏԱԶՈՏՈՒԹՅՈՒՆԸ
ԲԱԶՄԱՍԻԼԻՑԻՈՒՄԱՅԻՆ ԷՄԻՏԵՐՈՎ ՏՐԱՆԶԻՍՏՈՐՈՒՄ**

Աշխատանքում մշակված է նոր մեթոդ, որը հաշվի է առնում բաժանման սահմանագծի ազդեցությունը ոչ հիմնական լիցքակիրների հոսանքի վրա: Ստացված է բանաձև, որը թույլ է տալիս, կախված հատիկների քանակությունից, անդրադարձորեն հաշվարկել վերամիավորման արդյունաբար արագությունը (ՎԱԱ):

G.H. KIRAKOSSYAN, G.A. MAKARYAN, A.V. PETROSSYAN

**EFFECTIVE RECOMBINATION RATE INVESTIGATION IN THE TRANSISTOR WITH
POLYSILICON EMITTER**

Taking into account the interface influence on the minority carrier current, a new method is developed. A formula allowing to calculate recurrently the effective recombination rate (ERR) on silicon-polysilicon interface depending on the number of grains is obtained.